

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Пневматические строительные конструкции/В. В. Ермолов, У. У. Бэрд, Э. Бубнер и др.; Под ред. В. В. Ермолова. — М.: Стройиздат, 1983. — 439 с., ил.

Обобщен опыт возведения сооружений из пневматических конструкций в мировой практике, приведены сведения о последних разработках в области создания эффективных материалов оболочек, новых пневматических строительных конструкций и современных методов расчета. Авторы — крупнейшие специалисты мира, известные своими трудами в различных областях проектирования и использования пневматических строительных конструкций.

Для научных и инженерно-технических работников.

Табл. 42, рис. 355, список лит.: 209 назв.

Рекомендовано к изданию канд. техн. наук В. П. Шпаковым

Авторы: В. В. Ермолов (СССР), У. У. Бэрд (США), Э. Бубнер (ФРГ), Л. Виттинг (Финляндия), С. Б. Вознесенский (СССР), Э. Голуб, Л. Штепанек (ЧССР), Ю. Н. Орс (СССР), Ю. Мурата (Япония), И. Линкер (Австрия), Э. Фрицше, Г. Вольф, Г. Айзенхут (ГДР), В. Круммхойер (ФРГ), Д. Л. Г. Старджен, М. В. Уардл (США), К. Ишии (Япония), В. И. Усюкин (СССР), Э. Хауг (Франция), М. Майовецки, Дж. Тирони (Италия), Р. Харнах (ФРГ).

Государственная публикация научно-техническая библиотека СССР

7-83-50371 а

Предисловие

Можно смело сказать, что ни один из видов строительных конструкций не претерпел в столь короткий срок такого бурного развития, как пневматические конструкции. Менее 40 лет отделяет нас от того события, когда разложенная на земле бесформенная гряда мягкой технической ткани ожила под действием включенного вентилятора, по ткани побежали волны, она начала вспухать и подниматься, неуверенно покачиваясь и, наконец, наполнившись воздухом, неустойчивый матерчатый пузырь почти мгновенно стал упругим и устойчивым. В это чудо поверили, лишь ошупав купол руками, ощутив его стойкость и упругую незабываемость.

А сейчас уже около ста тысяч таких сооружений смонтированы на всех континентах мира и их изготавливают во всех технически развитых странах.

Пневматические строительные конструкции не имеют ни предшественников, ни традиций. В них все ново — и материалы, и принципы функционирования, и характер эксплуатации. Мало того, они как строительный объект не укладываются в привычные представления об инженерных сооружениях, о произведениях строительного искусства.

Традиционные материалы — древесина, камень, металлы, бетон отличались тяжестью, жесткостью, способностью оказывать высокое сопротивление всем видам напряженного состояния: растяжению, сжатию, изгибу, сдвигу, кручению. Материалы мягких оболочек пневматических сооружений могут сопротивляться только растяжению.

В традиционных конструкциях принцип предварительного напряжения всегда рассматривался не более как средство искусственного перераспределения усилий в конструкции с целью оптимального использования механических свойств применяемых жестких материалов. Предварительное напряжение в пневматических конструкциях — неперемное условие возможности их функционирования. Создаваемое воздухоподающим оборудованием, оно является основой их существования.

Эксплуатация традиционных зданий сводится лишь к обеспечению их сохранности, исправности, к созданию заданных условий комфорта. Если эти условия не соблюдаются, здание становится неполноценным в смысле способности выполнения своих функций. Эксплуатация воздухоопорных зданий требует прежде всего абсолютно надежной работы воздухоподающей системы. Прекращение подачи воздуха в этом случае не потеря комфорта, а прекращение существования сооружения.

Сорок лет (а если вести счет от начала массового производства, то двадцать лет) — срок очень небольшой для приобретения нужного опыта проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации столь новых сооружений. Известно, что кажущаяся простота пневматических конструкций привела к тому, что их изготовлением стали заниматься многие предприятия. Пионер в области пневматических сооружений Уолтер У. Бэрд организовал фирму «Бэрдэйр» в 1956 г., а в 1957 г. только в США насчитывалось уже около 50 подобных фирм. «Пневматический бум», охвативший всю Северную Америку, Европу и Японию, архитектор Р. М. Энгельбрехт [1], перефразируя известную строку С. Т. Колриджа, обрисовал как «Пузыри, пузыри везде...»¹. Этот начавшийся в 60-х годах «бум» и сопутствующая ему конкуренция фирм привели к тому, что некоторые предприниматели, не будучи достаточно компетентными, не смогли решить ряд конструктивных и технологических проблем совершенно незнакомого вида сооружений и не сумели обеспечить ни должного качества своей продукции, ни должного уровня их эксплуатации.

Наступила пора трезвого осмысления опыта применения пневматических конструкций в строительстве — пора подведения итогов, признания ошибок, констатации изменения точек зрения формулирования новых задач.

Главный вывод состоит в том, что пневматические конструкции оказались не такими простыми, какими они представлялись на первый взгляд. В то же время они обнаружили ряд неожиданных качеств, открыли некоторые возмож-

¹ «Water, water everywhere...» (англ.). S. T. Coleridge, «Old mariner».

ности, о которых ранее не догадывались или в которых сомневались. Все это позволило несколько по-иному представить себе те инженерные, технологические и архитектурные проблемы, которые возникли в процессе развития пневматических строительных конструкций во всем мире.

Сейчас в некоторых странах, особенно остро переживающих энергетический кризис, отмечается повышение интереса к экономике пневматических сооружений. Это вызвано главным образом повышенным по сравнению с капитальными сооружениями расходом горючего на отопление помещений, отделенных от внешней среды очень тонкой оболочкой. Существуют две тенденции преодоления последствий кризиса:

повышение термического сопротивления оболочек путем их дублирования или устройства ограждающих и поглощающих слоев и др.;

использование оболочки в качестве коллектора солнечной энергии.

В условиях недостаточного опыта изготовления и использования новых, необычных и непривычных сооружений особое значение приобретает интенсивный обмен опытом специалистов, посвятивших себя задаче успешной реализации этой перспективной разновидности пространственных конструкций. Нет ничего удивительного в том, что за сравнительно короткое время был проведен ряд международных форумов, посвященных только пневматической строительной тематике: в Штутгарте (1967), Чикаго (1971), Делфте (1972), Колумбии, штат Мерилэнд (1973), Лас-Вегасе (1974), Венеции (1977), Лондоне (1980).

Необходимо подчеркнуть организационную роль ИАСС (Международной ассоциации по пространственным конструкциям), которая не только провела половину перечисленных выше мероприятий, но начиная с 1967 г. обязательно включала тему пневматических конструкций в программу всех своих конгрессов и симпозиумов, состоявшихся в Токио и Киото (1971), Монреале (1976), Алма-Ате (1977), Моргантауне (1978), Мадриде (1979), Оулу (1980). Кроме того, ИАСС организовала под председательством проф. И. Цубои рабочую группу по пневматическим конструкциям, которая поставила одной из своих задач разработку международных норм проектирования и эксплуатации пневматических конструкций.

Настоящее издание как бы продолжает традицию обмена опытом и информацией. Для участия в нем был привлечен ряд крупнейших специалистов из десяти стран, известных своими научными трудами или практической деятельностью в области пневматических строительных конструкций.

Книга в основном посвящена пневматическим конструкциям воздухоопорного типа (включая пневматические линзы и подушки), что объясняется их более широким распространением по сравнению с другими разновидностями — пневмостержневыми и пневмопанельными конструкциями.

Авторами статей сборника являются (в порядке оглавления): В. В. Ермолов, д-р техн. наук, профессор Московского архитектурного института; У. У. Бэрд, президент фирмы «Бэрдэйр», США; Э. Бубнер, др-инж., профессор университета в Эссене, ФРГ; Л. Виттинг, технический директор фирмы «Рукка», Финляндия; С. Б. Вознесенский, канд. техн. наук, зав. лабораторией пневматических конструкций ЦНИИ строительных конструкций, Москва; З. Голуб, канд. техн. наук, и Л. Штепанек, инженер, НИИ строительных конструкций в Брно, ЧССР; Ю. Н. Орас, архитектор, Москва; Ю. Мурата, архитектор, Токио, Япония; И. Линекер, архитектор, Маттигхофен, Австрия; Э. Фрицше, Г. Вольф и Г. Айзенхут, инженеры, Высшее техническое училище, Дрезден, ГДР; В. Круммхойер, др-инж., Институт технического волокна, Вупперталь, ФРГ; Д. Л. Г. Старджен и М. В. Уардл, научные сотрудники фирмы «Дюпон», США; К. Ишии, др-инж., профессор университета в Иокोगаме, Япония; В. И. Усюкин, д-р техн. наук, профессор МВТУ им. Н. Э. Баумана; Э. Хауг, др-инж., сотрудник НИИ инженерных систем, Рунгис, Франция; М. Майовецки, др-инж., и Дж. Тирони, др-инж., профессора университета в Болонье, Италия; Р. Харнах, др-инж., профессор университета в Бохуме, ФРГ.

Д-р техн. наук, проф. В. В. Ермолов

I. Мировая практика пневматических сооружений

ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. В. Ермолов (СССР)

В самой середине нынешнего века страницы газет и популярной технической периодики запестрели сенсационными заголовками: «Воздушные замки XX века», «Сооружает вентилятор», «Крышу держит воздух», «Дома из ... воздуха», «Воздух в роли строителя», «Надуйте, пожалуйста, здание!», «Этажи поднимает ветер» и т. п.

Поскольку пневматические или надувные конструкции — вещь не такая уж новая (достаточно вспомнить аэростаты и надувные лодки), казалось бы, оснований для ажиотажа было недостаточно. Ведь известно, что надувные замкнутые оболочки существовали с незапамятных времен. Во всяком случае, «изобретательские заявки» на их использование в качестве плавсредств были выбиты на каменных стенах Ассирии почти 3000 лет тому назад.

Тем не менее, эмоции журналистов были вполне обоснованы. Появилось совершенно новое направление использования надувных конструкций. Только современная техника, в частности химия полимеров, сделала выработку прочных и воздухонепроницаемых материалов такой массовой, что стала возможной реализация идеи о покрытии мягкими оболочками многих сотен квадратных метров полезной площади.

Несмотря на кажущуюся простоту пневматические строительные конструкции являются продуктом высоко развитой техники второй половины XX в. При всей стародавности идеи как реальность они появились совсем недавно. И в этом нет ничего удивительного. Дело не только в том, что в прошлых веках еще не было синтетического волокна (но были хлопок и натуральный шелк!), полимеров для придания тканям воздухонепроницаемости (но были натуральные смолы и масла!), электровентиляторов (но были кузнечные мехи и паровые машины!), хотя все это очень важно. Однако еще важнее такие факторы, как прочность и долговечность материалов, а также устойчивость работы воздухоподающих систем, которые делают эксплуатацию сооружений надежной, как делает надежным самолет устойчивость работы его двигателей, т. е. все то, что составляет понятие высокой технической культуры, необходимого уровня которой минувшие века еще не достигли.

Пневматические строительные конструкции обычно делят на две совершенно самостоятельные группы: воздухоносные и воздухоопорные, отличающиеся друг от друга принципом статической работы, конструкцией и характером эксплуатации (табл. 1).

Таблица 1. Общая классификация пневматических строительных конструкций

Воздухоопорные	Геометрические формы	Простые	
		Составные	
		Сложные	
	Усиление канатами или сетями	Линзы (подушки)	
		Многоугольные	
		Многогранные	
Воздухонесомые	Панели	Стержни	
		Ортогональные	
		Изотропные	

Воздухонесомые (надувные) конструкции — это стержни или панели, несущая способность которых (сопротивление сжатию, изгибу, кручению) обеспечивается постоянным давлением воздуха в их замкнутом объеме. Как правило, они представляют собой отдельные конструктивные элементы с высоким внутренним давлением воздуха, требующим соответственно высокой степени герметизации. Если бы удалось преодолеть неимоверные трудности достижения абсолютной герметичности, то это были бы идеальные строительные конструкции, обладающие высокой несущей способностью при необычайной легкости. В настоящее время мы еще далеки от такого совершенства.

Воздухоопорные конструкции работают совсем по-другому. Их оболочка просто «лежит» на воздухе, которому выйти из-под нее некуда. Она «опирается» на воздух. Для противодействия внешним нагрузкам давление воздуха несколько повышается по сравнению с атмосферным. Вследствие низкого (100—400 Па) давления воздуха и непрерывной его подачи вентилятором особых требований к герметичности оболочки не предъявляется. Важно лишь, чтобы утечку воздуха компенсировало его поступление от вентилятора, что обычно трудностей не представляет. Воздухоопорные оболочки крепятся к опорному контуру (грунту или прилегающим жестким конструкциям).

Функциональное различие между воздухонесомыми и воздухоопорными конструкциями с точки зрения строителей состоит в том, что первые являются сравнительно небольшими конструктивными элементами (балками, стойками, арками, панелями и др.), тогда как вторые настолько велики, что представляют собой целое здание, в котором можно жить и работать. Отсюда их эксплуатационное различие — давление воздуха в полезном пространстве, образованном воздухонесомыми конструкциями, равно атмосферному, а под оболочкой воздухоопорного сооружения превышает его.

Из этой классификации выпадает особый вид двухслойных покрытий, которые называют *пневмолинзами*, если они перекрывают круглый, овальный или многоугольный план, и *пневмоподушками* — при прямоугольном плане. Пневмолинзы по принципу статической работы следует отнести к воздухоопорному типу, а по такому признаку, как отсутствие избыточного давления в эксплуатируемом пространстве, они ближе к воздухонесомым, представляя собой не здание в целом, что является признаком воздухоопорных сооружений, а лишь один его конструктивный элемент — покрытие.

Прошлое. Воздухонесомые и воздухоопорные конструкции развивались разными путями, и история у них разная.

Зарождение воздухонесомых, в буквальном смысле слова «надувных», конструкций теряется во мгле веков. Во всяком случае бесспорно, что первыми были замкнутые оболочки, изготовленные из шкур или внутренностей животных. Это емкости (бурдюки) и плавсредства (пузыри, плоты). Затем после развития ткачества — воздушные шары, аэростаты, дирижабли, надувные лодки, катера и др.

Примеров нестроительного применения замкнутых надувных оболочек можно привести очень много, начиная с уже упомянутых ассирийских плотов на надутых бурдюках. Интересно, что идея наполнения воздухом замкнутых оболочек не обошла и великого Леонардо, правда, в развлекательном плане. Вазари свидетельствует: «Изготовив особую восковую смесь, Леонардо на ходу лепил из нее тончайших зверюшек, которых, надувая, заставлял летать по ветру...» И дальше: «Нередко он тщательно очищал от жира кишки холощеного барана и до того их истончал, что они умещались на ладони. В другой комнате он поставил кузнечные мехи, к которым прикреплял один край вышеназванных кишок. Затем надувал их так, что они заполняли собой всю комнату, каковая была огромной. И всякий, кто в комнате находился, принужден был забиваться в угол. Этим он показывал, что прозрачные, полные воздуха кишки, которые вначале занимали мало места, могут занимать потом очень много места, и сравнивал это с талантом» [2].

Первым документированным предложением по использованию воздухоносных конструкций в строительстве является изобретение «аэробалки», представленное инженером И. А. Сумовским российскому Министерству путей сообщения в 90-х годах прошлого века. Известно также, что Сумовский запатентовал свое изобретение в США в декабре 1893 г. (американский патент № 511472).

Идея «аэробалки» осеняла впоследствии многие умы. Некоторые идеи были реализованы, например палатка Канешиге Номура «Тент-модерн» размером $2 \times 2 \times 2$ м с каркасом из четырех пневмостержней (японский патент № 65170, 1929 г.). Кстати, его сын Риотаро Номура возглавляет сейчас «Таёо Когю» — крупнейшую в Японии и одну из ведущих в мире фирм по производству пневматических и тентовых конструкций. Подобные палатки (типа «Иглу») серийно производят в Англии с 1936 г. до сего времени.

Говоря о пневматических конструкциях, нельзя не упомянуть имя проф. Г. И. Покровского, выступавшего с 1936 г. в печати с проектами зданий из пневмостержневых и пневмолинзовых элементов. Сам автор тогда считал их фантастическими, но сейчас их уже можно назвать устаревшими и отнюдь не потому, что они были негодными, а просто действительность прошла через них и опередила их. Заметим, что изображенное им пневмолинзовое покрытие зала (рис. 1) является первой публикацией этой идеи, которая в очень яркой форме была материализована фирмой Бэрдэйр в 1959 г. в виде покрытия над летним театром в Бостоне. После бостонского театра пневмолинзы в мировой строительной практике использовались неоднократно. Например, ими была перекрыта в 1974 г. целая торговая улица шириной 29,4 м и протяженностью 185 м в г. Марле, ФРГ. Однако размеры бостонского покрытия (диаметр 44 м) до сих пор остаются рекордными.

Развитие воздухоопорных, типично строительных конструкций шло совсем другими путями. Несмотря на успехи воздухоплавания, начавшегося еще в XVIII в. (полеты Крякутного в 1731 г. и

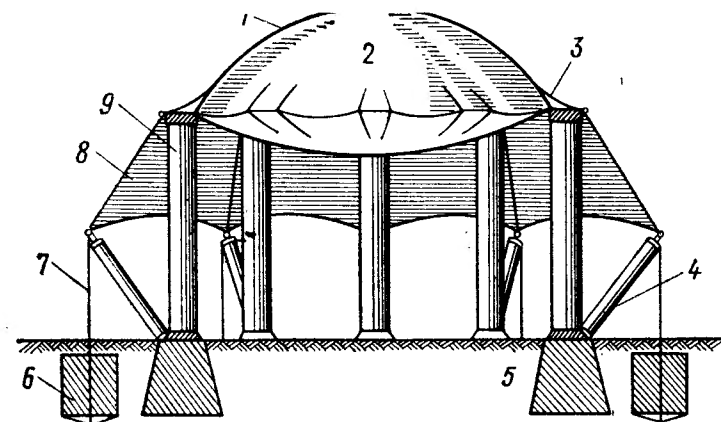


Рис. 1. Проект пневмолинзового покрытия над спортзалом (Г. И. Покровский, СССР, 1936)

1 — купол, поддерживаемый воздухом; 2 — камера со сжатым воздухом; 3 — свободно висящая металлическая пленка; 4 — подкос со сжатым воздухом; 5 — фундамент; 6 — противовес; 7 — металлические тяги; 8 — натянутая металлическая пленка; 9 — колонны со сжатым воздухом

братьев Монгольфье в 1783 г.) и основанного на использовании подъемной силы горячего воздуха (а затем водорода и гелия), заключенного в большую газонепроницаемую оболочку, мысль об использовании этих же оболочек, но прикрепленных к земле и наполненных воздухом, родилась до удивления поздно. Вероятно, ее рождению помешал пафос воздухоплавания, и «приземлять» его казалось нелепым. Только этим можно объяснить то, что опущенные на землю аэростаты заграждения, лежавшие во время войны на городских площадях, не превратились в надувные дома.

А ведь надувные здания были изобретены еще в 1917 г. английским инженером Фредериком У. Ланчестером (английский патент № 119339). Это была конструкция воздухоопорного цилиндрического свода со сферическими окончаниями, содержавшего все элементы современного пневматического сооружения — оболочку, анкерное устройство для крепления к грунту, входные шлюзы, воздухоподающую установку и даже систему усиливающих кольцевых канатов, которую и сейчас еще считают новинкой.

В 1938 г. Ф. У. Ланчестер опубликовал в печати новый проект воздухоопорного купола диаметром 330 м, как бы парящего над капитальным, квадратным в плане зданием. В конструкции купола были предусмотрены горизонтальные кольцевые канаты усиления, на наш взгляд, менее нужные, чем меридиональные.

Следующий проект воздухоопорного здания был разработан в 1941 г. американцем Гербертом Г. Стивенсом. Это был очень простой сферический сегмент с диаметром основания 366 м. Замечательно то, что материалом оболочки служила листовая сталь толщиной 1,27 мм.

Обращает на себя внимание тот факт, что и первоначальный проект Ланчестера, и проект Стивенса были выдвинуты в военные годы (соответственно 1917 и 1942). Первый предназначался для размещения полевых госпиталей, второй для авиасборочных заводов. Оба проекта подчеркивали, с одной стороны, стремление инженеров помочь своим странам преодолеть трудности военного времени, а с другой — демонстрировали присущую только пневматическим сооружениям ценную для того времени способность быть смонтированными за несколько дней.

Ни один из этих проектов, тем не менее, реализован не был. Мало того, они были просто забыты. И когда в 1946 г. американский авиационный инженер Уолтер У. Бэрд, выполняя задание (опять-таки военного характера) по разработке конструкции радиопрозрачного укрытия для вращающихся антенн радиолокаторов дальнего обнаружения, натолкнулся на мысль об использовании пневматических оболочек, он даже не знал о проектах Ланчестера, инженерный гений которого сумел превратить пневматический конструктивный элемент — «аэробалку» — в воздухоопорное здание.

Первое в мире реальное воздухоопорное здание, смонтированное У. У. Бэрдом в 1948 г., представляло собой сферический купол диаметром 16 и высотой 12 м. Некоторое время это изобретение держалось под секретом, но когда к началу 50-х годов сотня таких «радомов» выстроилась вдоль северных границ Америки, скрывать их стало бессмысленным. В 1956 г. Бэрд решил организовать свою собственную фирму «Бэрдэйр». Бизнес оказался выгодным, хотя сразу же появилось несколько конкурирующих фирм. Одна из них — «Сидэйр» — ухитрилась выбросить на рынок первые образцы своей продукции даже раньше Бэрда. В 1957 г. в США насчитывалось уже около 50 подобных фирм. Многие из них не выдержали конкурентной борьбы и прекратили свое существование, чему способствовало и то, что, не обладая опытом Бэрда, они совершили ряд технических ошибок, которые показали им, что воздухоопорные сооружения не так уж просты, как это может показаться с первого взгляда.

Европа в создании пневматических сооружений оказалась позади, и первым воздухоопорным зданием, которое увидели европейцы на своей земле в 1958 г., был изготовленный американской фирмой «Ирвин» выставочный павильон авиакомпания ПАНАМ на брюссельской Всемирной выставке. Вслед за этим во многих европейских странах и в Японии началось интенсивное освоение пневматических сооружений. Специализированные фирмы возникли практически во всех технически развитых странах.

Несмотря на ранние проектные начинания в области пневматических строительных конструкций (имеются в виду разработки Сумовского и Покровского), практическая реализация идеи воздухоопорных зданий в СССР началась с некоторым запозданием. Первое пневматическое сооружение — сферический купол диаметром 36 м был создан в 1959 г., второе — шлемовидный купол диаметром 22 м — в 1960 г., третье — полуцилиндрический свод со

сферическими торцами и автоматической системой регулирования поддува воздуха был смонтирован в 1960 г., а в 1961 г. экспонировался на ВДНХ в Москве. Оно стало первым в стране пневматическим сооружением, доступным для обозрения многим тысячам посетителей выставки.

Отделение истории воздухоносных пневматических конструкций от истории воздухоопорных зданий не должно создавать впечатления полной независимости их развития друг от друга. Это было сделано лишь для того, чтобы показать, что идея использования в качестве эксплуатируемого пространства подоболочечного объема с повышенным давлением воздуха оказалась настолько плодотворной, что немедленно вызвала к жизни многие забытые проекты пневмостержневых и пневмопанельных строительных конструкций.

На самом деле обе разновидности пневматических сооружений развивались одновременно, параллельно, и очень часто одни и те же научно-исследовательские организации, конструкторские бюро, специализированные предприятия и фирмы занимались ими обеими. Это вполне естественно. Не говоря об общем принципе, сходных материалах и расчетно-теоретических проблемах, воздухоносные и воздухоопорные конструкции нередко объединялись в едином сооружении комбинированного типа, обладающем признаками того и другого типов.

Настоящее. Воздухонесомые (пневмостержневые и пневмопанельные) строительные конструкции в настоящее время заметного распространения не получили. В СССР насчитывается несколько экспериментальных образцов. За рубежом серийный их выпуск также не производится, несмотря на ряд попыток многих фирм, в том числе таких солидных, как «Бэрдэйр» (США) и «Тайо Когиро» (Япония). Это объясняется следующими недостатками воздухоносных конструкций:

ограниченность пролетов, при экономической целесообразности не превышающих 12—15 м;

высокое рабочее давление воздуха в оболочках, обуславливающее повышение требований к материалам, и трудности обеспечения полной герметичности;

высокая стоимость, в 3—4 раза превышающая стоимость воздухоопорных зданий.

Существенным достоинством воздухоносных конструкций является отсутствие избыточного давления воздуха в эксплуатируемом пространстве и связанного с этим процесса шлюзования. Однако реализация данного преимущества сдерживается наличием указанных выше недостатков.

Воздухоопорные сооружения, наоборот, получили в строительстве очень широкое распространение. Общее число их во всем мире составляло в 1972 г. 20 тыс., а в 1976 г. — 50 тыс. единиц. Считается, что сейчас их около 100 тыс., т. е. ими перекрыто по меньшей мере 50 млн. м² полезной площади. Воздухоопорные здания отличаются простотой конструкции, безопасностью и безотказностью при

эксплуатации, низкой стоимостью, способностью перекрывать большие пролеты, а при условии постановки внутренних оттяжек — неограниченные площади.

Статистика последних лет свидетельствует, что в основном это складские помещения (50—70 %) и покрытия спортивных сооружений (20—40 %). Выставочные павильоны и укрытия строительно-монтажных площадок, более эффектные по размерам или эстетическим качествам, уступают им по массовости применения.

Нынешнее состояние и тенденции развития строительных конструкций типа мягких оболочек характеризуются следующими чертами:

сдвиг в сторону стационарного использования воздухоопорных оболочек (т. е. во всевозрастающем числе случаев монтаж их осуществляется на стационарных фундаментах), блокирования с капитальными сооружениями, повышения долговечности сооружений;

расширение практики использования «мягких каркасов» — канатно-сетчатого усиления оболочек (например, в США около 30 % воздухоопорных зданий изготавливают с таким усилением);

некоторая «заторможенность» развития воздухоносных пневматических конструкций;

повышение интереса к тентовым покрытиям, т. е. к мягким оболочкам, предварительное натяжение которых создается не аэро-статическим способом, а механическим;

зарождение «пневматической архитектуры» — появление таких пневматических зданий и сооружений, которые можно отнести к произведениям искусства.

Качественную сторону этого процесса определяют следующие технические достижения или тенденции:

успешная разработка новых материалов мягких оболочек — прочных, долговечных, негорючих, недорогих;

повышение функциональной устойчивости (надежности) воздухоподающей системы путем использования автоматики, обеспечивающей своевременное введение в действие дублирующих вентиляторов или резервных генераторов электроэнергии по сигналам датчиков о падении давления воздуха под оболочкой, отсутствии тока в сети, повышении скорости ветра;

решение проблемы больших пролетов;

решение проблемы перекрытия больших площадей с созданием искусственного климата под оболочкой;

исследование возможности использования оболочек в качестве коллекторов солнечной энергии.

Совершенствование материалов оболочек. Принципиальные требования, предъявляемые к материалам оболочек пневматических конструкций, сводятся к двум: прочности и воздухо непроницаемости. Оба эти требования удовлетворяют композиционные материалы, состоящие из силовой основы (ткани или сетки) и воздухо непроницаемого слоя (полимерного покрытия или дублирующей пленки). В результате появляются два вида материалов — ткани, покрытые или пропитанные пастообразными полимерами, и

двойные пленки с размещенным между ними армирующим слоем в виде сетки из синтетического волокна. Первый вид распространен значительно шире, чем второй.

Кроме этих двух требований, названных принципиальными, поскольку с ними связана возможность реализации принципа пневматической конструкции вообще, существует ряд дополнительных — негорючести, светопрозрачности, стойкости против химической или биологической агрессии, против действия низких и высоких температур, требования технологичности в смысле массовости производства, удобства стыкования полотнищ и др. Всем им современные материалы в той или иной степени удовлетворяют. Однако есть еще один важный показатель совершенства материала оболочек — долговечность. И в настоящее время тенденция развития материалов склоняется не столько в сторону прочности, сколько в сторону долговечности.

Современные материалы оболочек пневматических конструкций можно разбить на две группы. Первая — материалы обычных оболочек массового, серийного изготовления со сравнительно небольшими пролетами (до 60 м). Силовую основу материалов первой группы представляют ткани из синтетического волокна — полиамидного (капрон, нейлон, дедерон, перлон, силон, стилон и др.) или полиэфирного (лавсан, дакрон, гризутен, диолон, тревира, теторон, терилон и др.), реже поливинилспиртового (винол, винилон, куралон и др.) или полиакрилонитрильного (нитрон, орлон, дралон и др.).

В последние годы ведется разработка тканей из полиамидного волокна — СВМ в СССР и кевлара в США¹. Разрывная прочность этого волокна превышает прочность полиэфирных и полиамидных волокон и стали и равна прочности стекловолокна.

Наиболее распространенным покрытием материалов первой группы является пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ) или хлорсульфированный полиэтилен (хайпалон), реже употребляются синтетические каучуки.

Прочность материалов первой группы колеблется в широких пределах — от 40 до 100 кН/м (4—10 тс/м). Обычный срок службы оболочек из них составляет 5—10 лет, существенно уменьшаясь в районах с высоким уровнем солнечной радиации, разрушающей синтетическое волокно. Наилучшую защиту от ультрафиолетового облучения дало бы черное покрытие, но это делает материал светонепроницаемым. Кроме того, воздух под черной оболочкой сильно нагревается, превышая наружную температуру более чем на 10 °С.

Другая группа — это материалы, специально разработанные для оболочек уникальных сооружений, которые предназначены для длительной эксплуатации. Поиск волокон для силовой текстильной основы, прочных и стойких к ультрафиолетовому излуче-

¹ Тканям из кевлара посвящена статья Д. Л. Г. Старджена и М. В. Уардла в настоящем сборнике.

нию, заставил обратиться к неорганическим материалам, и прежде всего к стеклянному, стальному и даже угольному волокнам. Эти материалы к тому же негорюемы.

Интересно вспомнить, что оболочка первого воздухоопорного здания, возведенного У. Бэрдом в 1948 г., была выполнена из стеклоткани, покрытой неопреном. Сейчас к стекловолокну охотно возвращаются. Например, павильон США на ЭКСПО-70 в Осаке, а за ним ряд большепролетных покрытий спортивных сооружений, смонтированных в США в течение 1974—1982 гг., имели в качестве силовой основы материала оболочек стеклоткань.

Долговечность материала оболочки зависит и от срока службы полимерного покрытия ткани. Ни ПВХ, ни хайпалон, ни синтетические каучуки особой долговечностью не отличаются. Задачу создания более стойких покрытий решили путем использования фторсодержащих полимеров. Например, покрытия из тефлона (политетрафторэтилена) предположительно могут служить 20—30 лет, обладая к тому же светопрозрачностью и способностью отталкивать грязь. Стоимость таких материалов покрытий пока еще очень высока, примерно в пять раз выше стоимости материалов первой группы, вследствие чего их применяют только для капитальных сооружений. Разработанные специально для этих целей материалы под фирменными названиями ширфилл и фэбрасорб детально рассматриваются в статье У. Бэрда «Стеклоткань, покрытая тефлоном, — уникальный новый материал для тканевых сооружений», публикуемой в настоящем сборнике.

Металл как материал пневматических конструкций может быть использован не только в виде волокна. Обладая прочностью и воздухонепроницаемостью, металлические листы сами по себе представляют готовый материал воздухоопорных оболочек. Использование тонких металлических листов в этих целях связано со следующими затруднениями:

- предотвращением концентрации напряжений в металле при складкообразовании во время перехода оболочки из неподдутого состояния в поддутое и наоборот;

- сложностью соединения между собой тонких листов;

- повышенной опасностью потери прочности в результате коррозии.

Все эти недостатки металлических мембран в той или иной мере преодолеваются. Доказательством могут служить два примера возведения воздухоопорных зданий с металлическими оболочками.

1. Покрытие спортивной арены в г. Галифаксе (Канада) размером в плане $91,5 \times 73,2$ м со стрелой подъема 3 м (рис. 2), построенное в 1979 г. по проекту инж. Д. Синоски [3]. Оболочка выполнена из 27 полотнищ нержавеющей стали толщиной 1,6 мм. Швы между полотнищами перекрыты складчатыми гибкими накладками, компенсирующими сдвиги листов при переходе из плоского во вспарушенное или, наоборот, в провисшее состояние.

2. Купол диаметром 20 и высотой 6 м, возведенный в Японии по проекту М. Кавагучи [4]. Оболочка выполнена из 72 полотнищ

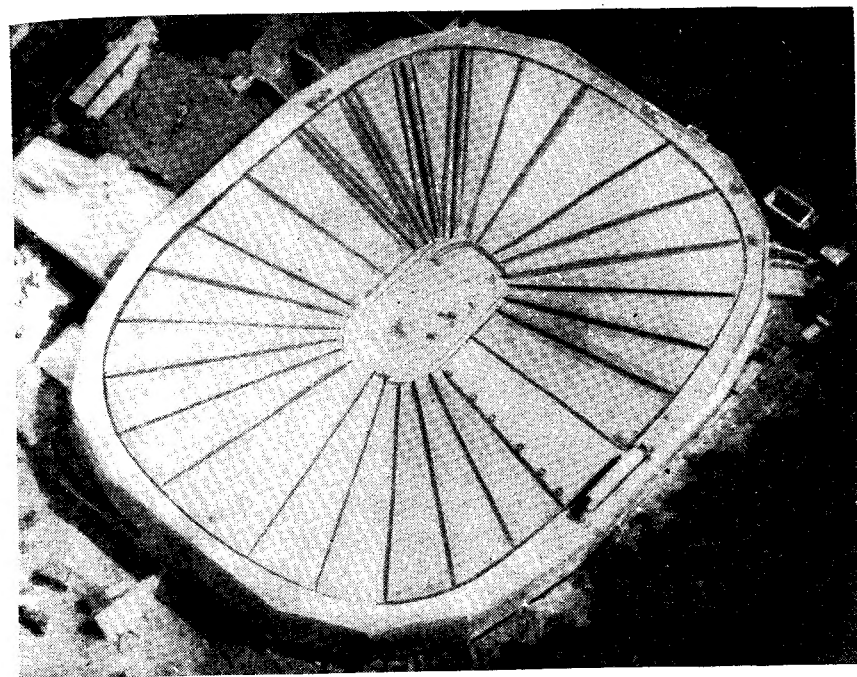


Рис. 2. Металлическое воздухоопорное покрытие стадиона (Д. Синоски, Канада, 1979)

меридионального направления, изготовленных из стали толщиной 0,3 мм. Образующая поверхности вращения подобрана так, чтобы при действии избыточного давления воздуха кольцевые усилия были нулевыми. Это существенно упростило конструкцию меридиональных стыков полотнищ.

Проблема больших пролетов. Одна из важнейших тенденций прогресса в строительстве — перекрытие больших пролетов при малом расходе материалов. Можно утверждать, что в этом отношении пневматические конструкции представляют собой предел достижимого. Вряд ли появится какая-нибудь другая конструкция, где на 1 м^2 перекрываемой площади расходуется менее 1 кг материала. Единственные из строительных конструкций, у которых собственный вес 1 м^2 не увеличивается с ростом пролета, — пневматические.

Увеличение пролета воздухоопорной оболочки, естественно, вызывает в ней повышение усилий. Для решения этой проблемы требуется либо повышение прочности материала, либо создание новых конструктивных форм, дающих возможность искусственного увеличения местной кривизны поверхности оболочки. Последний путь более рационален. Превращение гладкой поверхности оболочки с большим радиусом кривизны в поверхность сильно искривлен-

ную — гофрированную, ребристую, пузырчатую, бугорчатую — возможно лишь при использовании дополнительных или, как их часто называют, усиливающих элементов (канатов, сетей, оттяжек, диафрагм).

Пролеты оболочек, не имеющих «мягкого каркаса» в виде канатов или сеток, достигли следующих пределов: цилиндрические 57 м, пологие сферические 74 м, подъемистые в $\frac{3}{4}$ сферы — 64 м. Дальнейший рост пролетов таких оболочек требует использования сверхпрочных материалов, создание которых хотя технически и возможно, но экономически нецелесообразно.

Задачу увеличения пролетов воздухоопорных оболочек в настоящее время решают путем введения в их конструкцию усиливающих элементов. Использование канатов и сетей позволяет передать им основные силовые функции, а оболочку разгрузить, предоставив ей роль ограждения и выполнения локальных силовых функций лишь в пределах междросовых ячеек. Канаты из стали или синтетического волокна, одиночные или сплетенные в сети, позволяют во много раз увеличить пролеты сооружений. В то же время требования к прочности материала самой оболочки могут быть снижены.

Использование высокой несущей способности стальных канатов сразу изменило ряд конструктивных черт воздухоопорной оболочки. Прежде всего она стала полой. Возросшие при этом усилия от избыточного давления воздуха не превысили требований к прочности самой оболочки — усилия пришлось на канаты. В то же время ветровое воздействие на пологую оболочку снизилось как в его активной зоне, так и в зоне отсоса.

Распор воспринимает сжатое опорное железобетонное кольцо с таким расположением канатов, при котором моменты, изгибающие кольцо, минимальны. Основные геометрические зависимости, позволяющие достигнуть минимума моментов, изгибающих опорное кольцо (рис. 3), запатентованы одним из создателей этой системы — Д. Гейгером. В частности, он доказывает, что если план покрытия представляет собой прямоугольник со срезанными углами, то линии среза также должны быть параллельными диагоналям этого прямоугольника (патент США № 3835559). Такой конструктивный прием был использован при устройстве покрытий над стадионами в городах Понтиак и Сиракьюс (рис. 4), США. Поднятие опорного кольца до уровня карниза перекрываемого здания или расположение его на земляной насыпи позволило найти такое соотношение высотных отметок, когда пологая оболочка, лишенная по какой-либо аварийной причине подпора воздуха, не опускается до пола, образуя висячую мембрану. Это был важный элемент безопасной эксплуатации пневматического сооружения, поскольку вопрос о последствиях опускания оболочки возникал на всех стадиях проектирования и эксплуатации. Кстати, правильность такого мероприятия подтвердил случай, произошедший во время бури в августе 1976 г. с крупнейшей в мире воздухоопорной оболочкой стадиона в Понтиаке. Порванная оболочка, лишась подпо-

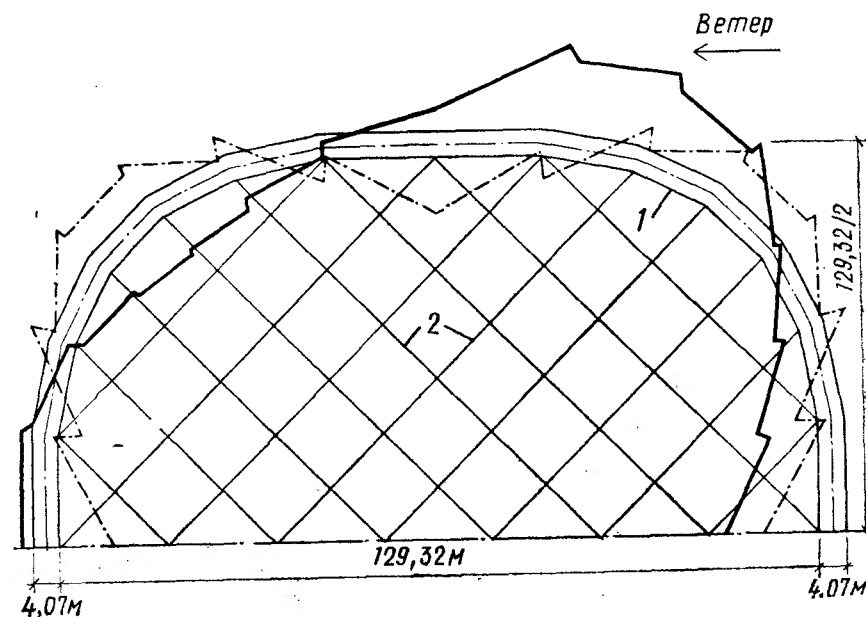


Рис. 3. Половина плана покрытия спортзала в Сидар Фоллис (США) с эпюрами максимальных изгибающих моментов в железобетонном опорном кольце; сплошные линии — нагрузки от ветра и избыточного давления, штрихпунктирные линии — нагрузки от снега без избыточного давления

1 — железобетонное опорное кольцо; 2 — стальные канаты $\varnothing$ 73 мм

ра воздуха, превратилась в висячую конструкцию без каких бы то ни было неприятных последствий.

Первая большепролетная пологая оболочка была смонтирована в 1969 г. на ЭКСПО-70. Она перекрывает площадь $78,1 \times 132,8$ м при высоте подъема 7 м ($f/l = 9\%$). На основе этого здания был разработан новый тип большепролетного воздухоопорного сооружения со следующими отличительными чертами:

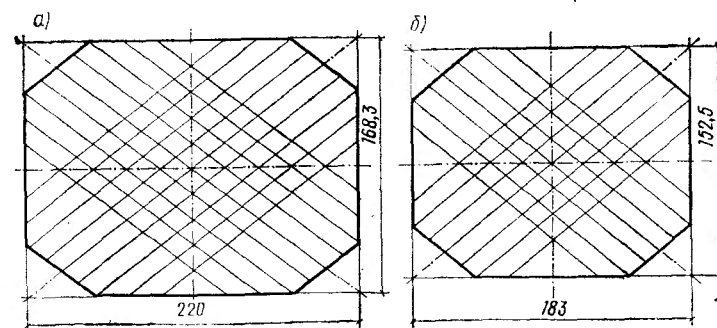


Рис. 4. План расположения усиливающих канатов на воздухоопорных оболочках покрытий стадионов Понтиак (а) и Сиракьюс (б), США

малая относительная высота (10—15 %);
ромбическое расположение стальных канатов с шагом 10—12 м, идущих параллельно диагонали прямоугольника, который описан вокруг контура опорного кольца;

материал оболочки — стеклоткань, покрытая тефлоном, с ожидаемым сроком службы 20—30 лет;

наличие опорного кольца, приподнятого над полом.

Такое покрытие легче покрытий из железобетона, стали и дерева примерно в 10 раз, что соответственно облегчает стены и фундаменты. По оценкам американских экономистов стоимость этих покрытий составляет примерно 50 % стоимости покрытий из традиционных материалов. В течение 1974—1980 гг. в ряде стран оболочками этой системы, рассчитанными на длительные сроки службы, был перекрыт ряд спортивных сооружений (вплоть до полно-размерных стадионов).

Энергетические проблемы. Теплотехнические показатели оболочек воздухоопорных зданий очень невысоки. Коэффициент теплопроводности однослойной оболочки $K \approx 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Это значит, что через оболочку сооружения размером $36 \times 18 \times 9 \text{ м}$ (площадь боковой поверхности 880 м^2) при перепаде температур 40°C проходит тепловой поток мощностью около 200 кВт.

Существенное, до двукратного, снижение теплопотерь достигается устройством двухслойной оболочки или утеплением ее слоем поролона толщиной 7—8 мм, что снижает величину K до $3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

До недавнего времени существовала проблема: что выгоднее экономически — устраивать второй слой оболочки или интенсивнее ее обогревать? С наступлением энергетического кризиса задача была решена сама собой и однозначно: проявилась четкая тенденция к использованию двухслойных оболочек. Эта тенденция быстро реализовалась на практике, и сейчас ряд зарубежных фирм выпускают двухслойные оболочки с $K=2,5\text{—}4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Они состоят из внешней несущей оболочки и свободно подвешенной к ней внутренней. Давление воздуха в помещении и в межоболочечном пространстве одинаково. Это позволяет не только снять ряд требований (и в первую очередь — прочности) с материала внутренней оболочки, но и оборудовать ее дополнительными средствами теплоотражения, звукопоглощения, цветового оформления интерьера и др.

Внутреннюю оболочку выполняют из недорогого, легкого материала, прикрепляемого к материалу внешней оболочки в отдельных точках, при этом оставляют минимальный просвет 100—150 мм. Стоимость оболочки при использовании второго слоя возрастает на 30 %, но расходы на отопление сокращаются вдвое. Подобная оболочка, изготовленная финской фирмой «Рукка», установлена над теннисным кортом московского плавательного бассейна «Чайка».

Ограждающие конструкции (стены, кровли) зданий из камня, бетона и дерева обладают высоким термическим сопротивлением,

обеспечивающим оптимальный баланс расхода тепла и его поступления от обогревательных устройств. Это же свойство ограждений предотвращает нагревание воздуха в помещении в результате теплового действия инсоляции.

Тонкие оболочки пневматических сооружений не в состоянии обеспечить такой же уровень термического сопротивления. Поэтому их тепловой режим должен строиться на совершенно других принципах.

Громадные поверхности оболочек воздухоопорных сооружений подвергаются солнечной радиации, с которой связаны три задачи эксплуатации: отопление, охлаждение и естественное освещение помещений под оболочкой. Эти задачи, в свою очередь, связаны с такими свойствами материалов оболочек, как отражение, поглощение и пропускание солнечной энергии, характеризующимися соответствующими коэффициентами, показывающими, какая доля солнечной энергии отражается оболочкой, поглощается ею или проникает сквозь нее.

Свойства обычных материалов оболочек в зависимости от цвета их поверхности колеблются в довольно широких пределах: коэффициент отражения — от 10 до 70 %; коэффициент поглощения — от 35 до 90 %; коэффициент пропускания — от 5 до 20 %.

Зимнее солнце слабо нагревает воздух под оболочкой, летом, наоборот, солнце перегревает его на $5\text{—}10^\circ\text{C}$ по сравнению с наружным, порой до уровня заметного снижения комфорта. Поэтому предпочтению отдается материалам светлым, с высокой отражающей способностью.

Двухслойные оболочки позволяют более активно пользоваться энергией солнца. Делая наружную оболочку светопроницаемой, а внутреннюю — поглощающей, можно межоболочечное пространство превратить в своего рода «горячий ящик» и использовать энергию нагретого воздуха либо для отопления, либо для охлаждения воздуха под оболочкой.

Трехслойные оболочки с пневматически управляемым средним слоем открывают еще более широкие возможности регулирования микроклимата укрываемых помещений и использования солнечной энергии.

Известен ряд проектов пневматических оболочек больших пролетов, авторы которых пытаются реализовать возможность использования солнечной энергии для создания и регулирования заданного микроклимата под оболочкой. Назовем два из них, отличающихся наиболее детальной проработкой и теоретической обоснованностью.

Оболочка в Джексонвилле (Флорида, США) представляет собой ряд «солнечных ячеек» со светопроницаемой двойной верхней мембраной и одинарной нижней, поглощающей и хорошо изолированной от внутреннего пространства (рис. 5). Оболочка покрывает площадь более $40\,000 \text{ м}^2$, примыкающую к длинному капитальному зданию, где расположены административные помещения, выставочный зал и ботанический сад. Оболочка служит

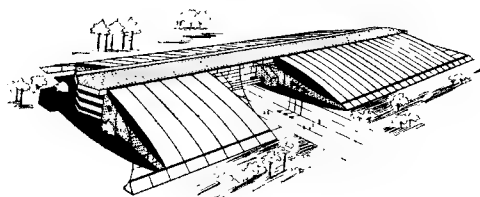
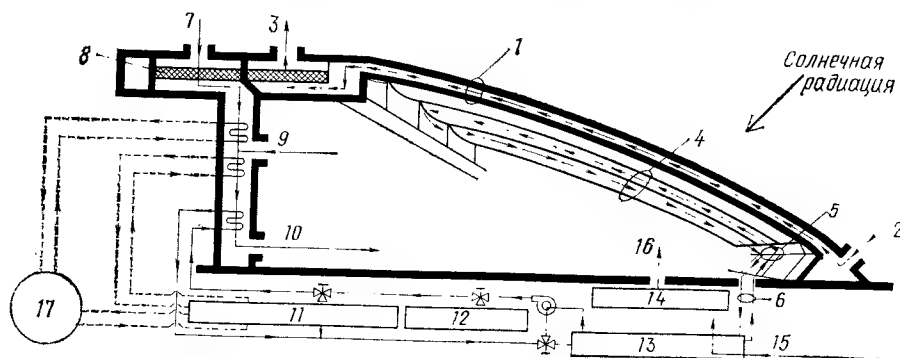
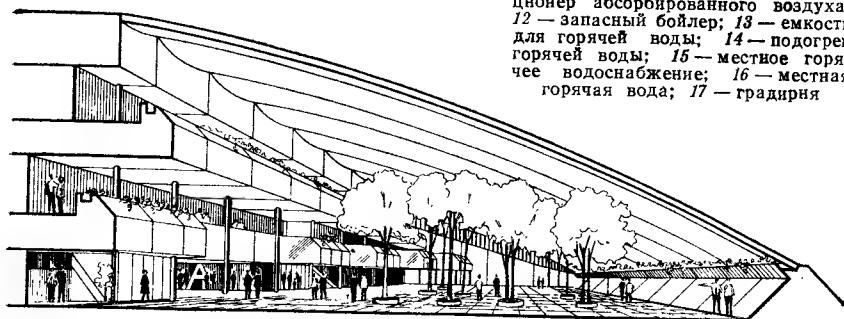


Рис. 5. Схема двухслойной воздухоопорной оболочки, используемой как солнечный коллектор (Джесонвилл, США)

1 — солнечная ячейка А, нагрев воздуха для осушения дегидратационного слоя; 2 — забор воздуха в солнечную ячейку А; 3 — вытяжка из солнечной ячейки А; 4 — рециркулируемый нагретый воздух в солнечной ячейке В; 5 — смешивки горячей воды в солнечной ячейке В; 6 — подача и возврат горячей воды из солнечной ячейки В; 7 — забор свежего воздуха; 8 — два дегидратационных слоя; 9 — рециркулированный воздух; 10 — кондиционированный воздух; 11 — кондиционер абсорбированного воздуха; 12 — запасной бойлер; 13 — емкость для горячей воды; 14 — подогрев горячей воды; 15 — местное водоснабжение; 16 — местная горячая вода; 17 — градирня



солнечным коллектором; нагреваемый в нем воздух используется для дополнительного обогрева помещения или для понижения температуры воздуха в помещении, проходя цикл кондиционирования, включающего отбор тепла охлаждаемой в градирне водой [5].

Трехслойная оболочка в Денвере, Колорадо (США) перекрывает площадь 121×305 м, на которой расположены двух- и трехэтажные учрежденческие здания (рис. 6). Верхняя и средняя мембраны сделаны наполовину отражающими, наполовину светопропускаемыми; нижняя полностью светопропускаема. Средняя мембрана сделана подвижной, чтобы приспособливаться к сезон-

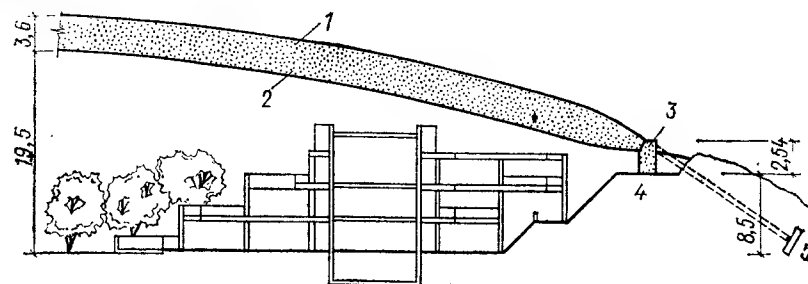


Рис. 6. Двухслойное воздухоопорное покрытие над группой административных зданий (Денвер, США)

1 — наружная оболочка; 2 — внутренняя оболочка; 3 — опорное кольцо; 4 — земляная насыпь; 5 — анкерика

ным изменениям погоды. Будучи пневматически управляемой, средняя мембрана, прижимаясь к верхней, образует полностью отражающую поверхность, исключая инсоляцию помещения летом. При опускании средней мембраны лучи низко стоящего солнца беспрепятственно проникают в помещение. Функций кондиционирования оболочка не выполняет.

Проблемы надежности и безопасности. Пневматические здания воздухоопорного типа — наиболее безопасные из всех строительных сооружений. Их «обрушение» невозможно. В самом худшем случае — при полном прекращении подачи воздуха — оболочка очень медленно (в течение десятков минут) опускается на пол. Такие здания идеально сейсмостойки.

В то же время пневматические сооружения самые ненадежные в том смысле, что их устойчивость, незыблемость являются функцией не только прочности несущих и ограждающих конструкций (которые оболочка в себе совмещает), но и непрерывности воздухоподдачи в нужных объемах и на нужном уровне давления.

Расчеты показывают, что поддутая в должной степени и надежно закрепленная по контуру оболочка не может быть разорвана даже ураганным ветром. Тем не менее именно с действием ветра чаще всего бывают связаны те аварии воздухоопорных оболочек, когда по тем или иным причинам избыточное давление воздуха под оболочкой падало ниже расчетного. Этими причинами могут быть:

- прекращение подачи электроэнергии;
- выход из строя вентиляторной установки;
- разгерметизация оболочки вследствие выдергивания анкеров из грунта, опрокидывания каркасов шлюзов, вентиляторов или шкафов управления, отрыва мягких воздухопроводов от патрубков оболочки или от диффузоров вентиляторов, прорывов оболочки близко расположенными острыми выступами оборудования или хранимого имущества и др.

Поэтому при рассмотрении вопросов взаимодействия оболочки и ветра, которые решаются путем расчета или моделирования, считают, что надежность энергоснабжения и устойчивость работы

вентиляторов являются столь важными задачами, что ошибочное или даже небрежное отношение к ним может привести к печальному результату — разрушению оболочки ветром.

На первых порах освоения пневматических сооружений, в период их широкой пропаганды, считалось, что функционирование оболочки может обеспечить один обычный промышленный вентилятор. Вскоре практика эксплуатации показала, что это не так.

Современное воздухоопорное здание должно быть укомплектовано довольно сложной, автоматически действующей системой обеспечения непрерывной подачи воздуха (рис. 7). Многолетнее устойчивое функционирование лучших образцов пневматических сооружений, снабженных надежной системой включения дублирующих вентиляторов или резервных генераторов тока, наглядным образом подтверждают справедливость этого требования.

Непрерывная и интенсивная подача воздуха под оболочку резервными вентиляторами является к тому же важнейшим противопожарным фактором. Во-первых, воздух, вырывающийся наружу через прогоревшее отверстие, охлаждает его края и не позволяет огню распространяться по периметру дыры. Во-вторых, чем интенсивнее приток воздуха под оболочку, который возмещает потери его через прогоревшие отверстия, тем продолжительнее время функционирования сооружения, необходимое для эвакуации людей и имущества. Поэтому очень важно, чтобы пожар в помещении не сопровождался прекращением подачи воздуха под оболочку. Нужно, чтобы вентиляторы работали не только как можно дольше, но и как можно производительнее, компенсируя утечки воздуха через прогоревшие дыры или открытые из-за пожара дверные проемы.

Некоторая неопределенность в отношении пожарной опасности является одним из факторов, сдерживающих широкое распространение воздухоопорных зданий. Они во многом заметно отличаются от традиционных сооружений — их оболочка чрезвычайно тонка, функционирование связано с непрерывным снабжением внутреннего объема помещения воздухом повышенного давления. Привычные критерии пожарной безопасности зданий здесь неприменимы. Непригодны и обычные понятия — «группа возгораемости» (несгораемые, трудносгораемые, сгораемые), «предел огнестойкости» (в часах), «степень огнестойкости». Очевидно, трудно понять, что и сам пожар в воздухоопорном здании, и его последствия совершенно несопоставимы с пожаром в традиционном смысле. Невозможно и оценить их одинаковыми объективными показателями. Ввиду этого представляют большой интерес натурные эксперименты, имитирующие пожар под оболочкой. Они проводились

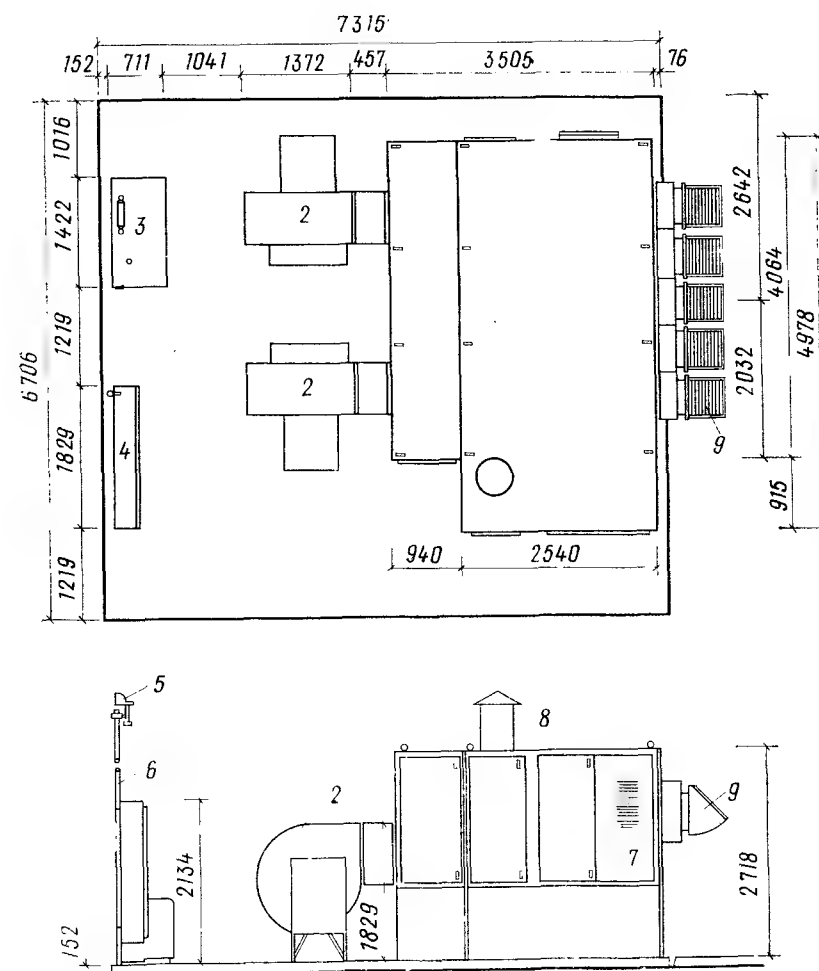
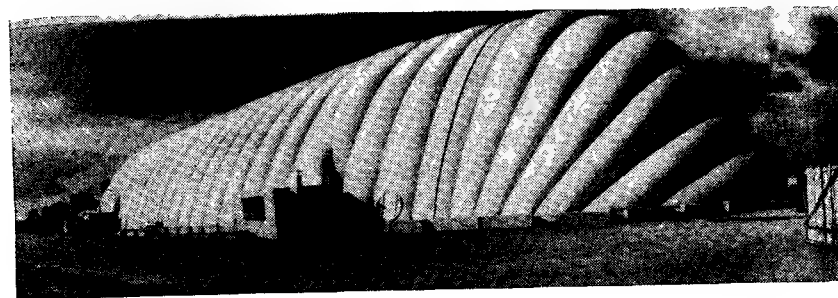


Рис. 7. Воздухоопорное сооружение размером в плане 103×40 м с вентиляторно-отопительным блоком в Москве (фирма «Сидэйр») →

а — общий вид сооружения; б — схема блока; 1 — отопительная установка 4220 МДж; 2 — вентилятор; 3 — генератор 15 кВт; 4 — шкаф управления; 5 — датчик ветра; 6 — трубчатая стойка высотой 6 м; 7 — воздухозаборное отверстие; 8 — выводная труба; 9 — выход теплого воздуха

во многих странах, и их результаты позволяют сделать некоторые заключения.

Огневые испытания показывают, что тонкая оболочка почти независимо от степени возгораемости ее материала довольно быстро прогорает при горении имущества в помещении, а при достаточно больших размерах прогоревших дыр опускается на пол. Поэтому основные меры противопожарной профилактики должны быть направлены на предотвращение возможности прогорания больших отверстий и на увеличение продолжительности времени опускания оболочки на пол.

Следует отметить такие положительные особенности воздухоопорных оболочек, как немедленное обнаружение их возгорания, способность восходящего потока горячих газов поддерживать оболочку, простота эвакуации, связанная с одноэтажностью здания и с непосредственной близостью безопасных площадей. При горении самой оболочки значительного количества тепла не выделяется, гораздо опаснее горючее имущество под оболочкой. По своим последствиям и по количеству выделяемого тепла пожар в пневматическом сооружении не идет ни в какое сравнение с пожаром, например, в деревянном павильоне.

Несгораемые материалы не имеют явных преимуществ перед трудносгораемыми, так как при малой толщине оболочки все равно прогорают, допуская дальнейшую утечку воздуха. Однако применение трудносгораемых материалов для оболочек во всех случаях предпочтительнее, поскольку есть уверенность в том, что размеры прогоревших дыр будут оставаться небольшими.

Проблема пожарной защиты воздухоопорных зданий еще далека от полного разрешения. Предстоит дать ответ на ряд вопросов: классификация с позиций пожарной опасности функций пневматических сооружений, установление нормативов их площади в зависимости от назначения, нормирование численности людей, одновременно находящихся в здании, и др. В основе опытно-теоретического исследования должно лежать построение модели пожара, учитывающей все временные факторы, связанные со свойствами материалов, характеристиками вентиляторных установок, особенностями горючей «начинки» помещения и др. Необходимо проведение серии тщательно продуманных натурных экспериментов при разнообразных параметрах сооружений и пожара.

Теория мягких оболочек и практические методы расчета. Наибольший интерес для практики проектирования пневматических строительных конструкций представляют в конечном счете следующие три задачи теории мягких оболочек: нахождение оптимальной формы оболочки; определение перемещений оболочки под действием нагрузок; установление картины распределения усилий по поверхности оболочки.

Произвольно выкроенная мягкая оболочка принимает такую форму, которая при данном сочетании нагрузок исключает возможность возникновения в ней сжимающих усилий, оставляя в действии лишь растягивающие, до нулевых включительно. Формаль-

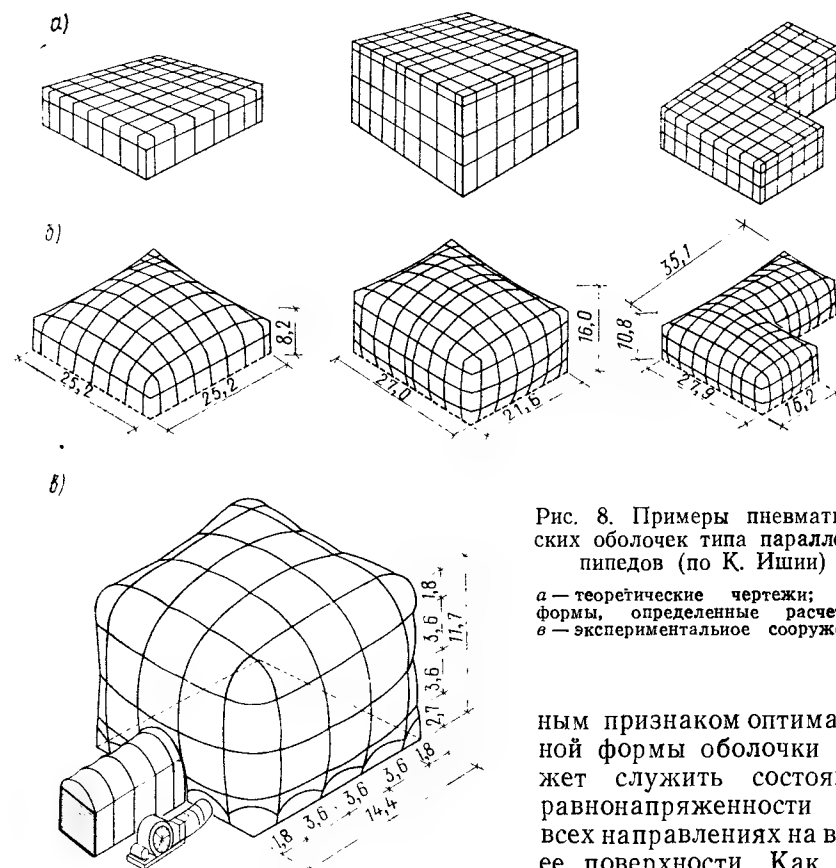


Рис. 8. Примеры пневматических оболочек типа параллелепипедов (по К. Ишии)

а — теоретические чертежи; б — формы, определенные расчетом; в — экспериментальное сооружение

ным признаком оптимальной формы оболочки может служить состояние равнонапряженности во всех направлениях на всей ее поверхности. Как из-

вестно, таким свойством обладает мыльная пленка, поверхность которой описывается дифференциальным уравнением в частных производных.

Интегрирование этого уравнения при заданных граничных условиях выполняется одним из численных методов, основанных на дискретизации задачи, например после превращения уравнения в конечно-разностное. Полагая, что основной и постоянной нагрузкой для воздухоопорных оболочек является внутреннее давление воздуха, можно считать, что найденная при этой нагрузке форма оболочки и будет оптимальной, так как условие равнонапряженности полностью соблюдено. Однако при появлении любых других нагрузок оно нарушается. Действие временных нагрузок (ветер, снег) может вызвать либо появление морщин и складок (с чем обычно мирятся в силу их «временности»), либо повышение растягивающих усилий до уровня расчетных сопротивлений.

Идеальная форма мыльной пленки при проектировании оболочек почти никогда полностью не реализуется. Стремление к лучшему использованию объема (например, углы оболочки в виде мыльной пленки всегда несколько приплюснуты, образуя «мертвое

пространство» в помещении) и более рациональному раскрою полотнищ, а также архитектурные соображения, как правило, приводят к отходу от форм мыльной пленки (рис. 8). Эти отклонения, однако, не должны приводить ни к перенапряжению, ни к складкообразованию. Формы, подсказанные мыльной пленкой, идеальны лишь для одного вида нагрузки — внутреннего давления воздуха. Поэтому мыльную пленку можно рассматривать лишь как первое приближение к правильной форме оболочки. Учет реальных условий ее работы, создаваемых действием внешних нагрузок и отходом от идеальной геометрии, требует анализа напряженно-деформированного состояния оболочки скорректированной формы.

Задаче нахождения форм оболочек посвящен ряд работ, в том числе и тех, которые публикуются в настоящем сборнике.

Под действием нагрузки форма оболочки изменяется. Каждая точка ее поверхности перемещается. Перемещения правильно скроенной оболочки¹ могут быть следствием двух причин. Первая — упругие или пластические удлинения материала (деформации). Вторая — изменение геометрии оболочки как результат потери устойчивости (т. е. возникновения нового равновесного состояния) при приложении внешних нагрузок.

Раздельное рассмотрение двух причин перемещения оболочки следует считать условным. Однако, учитывая относительную малость перемещений, связанных с первой причиной, ею при практических расчетах пневматических строительных оболочек часто пренебрегают, уделяя основное внимание перемещениям кинематического характера. Эти перемещения, являясь специфичными для пневматических конструкций, представляют особый интерес в связи со следующими соображениями.

Во-первых, перемещения оболочки, т. е. изменения ее формы под действием внешних нагрузок, влияют на интенсивность и характер этих нагрузок. Поэтому формоизменения оболочки и изменения нагрузки (например, снеговой или ветровой) развиваются как взаимозависимый процесс. Во-вторых, статистика аварий воздухоопорных сооружений свидетельствует о том, что часто их причиной был контакт оболочки с жесткими предметами, находящимися в помещении. Поэтому определение пределов возможных перемещений оболочек, особенно в динамическом режиме их работы при действии ветра, имеет особый практический смысл.

Основы общей теории мягких оболочек в классической математической постановке были заложены проф. С. А. Алексеевым в работе [6], где он сформулировал три основные ее задачи. Теории мягких осесимметричных оболочек посвящена другая его работа [7].

Построение общей теории мягких оболочек — проблема весьма сложная. Несмотря на наличие такого упрощающего основного уравнения равновесия фактора, как абсолютная безмоментность,

¹ Правильно скроенной оболочкой можно считать такую, в которой действие внутреннего давления воздуха (от нуля до расчетного уровня) не вызывает отрывающих усилий.

изменения геометрии оболочки под действием нагрузки существенно усложняют проблему. Прямое использование уравнений классической безмоментной теории оболочек оказалось возможным только для решения немногих частных задач — оболочек вращения с осесимметричным нагружением и длинных цилиндрических оболочек, нагруженных вдоль образующей (плоская задача).

Задачи общей теории мягких оболочек применительно к пневматическим строительным конструкциям детально разрабатывались и другими исследователями — А. С. Григорьевым, Дж. Леонардом, П. Глокнером, Н. Сриваставой и др. Несмотря на то, что считалось, что задачи решаются в нелинейной постановке, нелинейность понималась лишь в физическом смысле, но не в геометрическом. Большой вклад в теорию мягких оболочек сделал проф. В. Э. Магула. Результаты его обширных теоретических изысканий изложены в монографии [8] и многих статьях, посвященных в основном мягким судовым конструкциям [9].

Строгая постановка задачи об определении напряженно деформированного состояния мягкой оболочки сталкивается с необходимостью учета нелинейных связей между усилиями и деформациями, с одной стороны, и деформациями и перемещениями — с другой. Эти нелинейности — физическая и геометрическая — приводят к сложной системе дифференциальных уравнений равновесия в частных производных, интегрирование которых, даже численными методами с применением ЭВМ, сопровождается многими трудностями.

Пневматическим строительным конструкциям свойственны сравнительно малые деформации в рабочих диапазонах усилий, но они испытывают большие перемещения, соизмеримые с размерами самих оболочек. Поэтому учет геометрической нелинейности является для теории мягких оболочек задачей более важной, нежели принятие во внимание нелинейности физической. К сожалению, эта задача одновременно и более сложная. «Барьер геометрической нелинейности» общей математической теорией мягких оболочек еще не преодолен.

Поэтому вполне естественны многочисленные попытки ряда исследователей освободиться в какой-то мере от некоторых расчетных зависимостей с целью упрощения расчетной процедуры, снижения расхода машинного времени ЭВМ и объема ее памяти.

Строительная практика сталкивается, как правило, с геометрически сложными оболочками, составленными из разнородных поверхностей, и с разнообразными контурными закреплениями. Нагрузки встречаются односторонние (снег), несимметричные (ветер), сосредоточенные (оборудование, оттяжки). Поэтому не только на первых порах освоения пневматических конструкций, но и в настоящее время проектировщики (а порой и теоретики, если им приходится решать практические задачи) пользуются уравнениями безмоментной линейной теории оболочек, вводя ряд допущений, упрощений и пренебрегая некоторыми обстоятельствами.

Такую теорию оболочек обычно называют элементарной, вкладывая в это понятие не только отсутствие аппарата высшей математики, но и введение серии упрощений. Элементарная теория допускает расчленение оболочки на ряд разнородных сопряженных поверхностей, причем условиями совместности деформаций и напряжений на границах сопряжения часто пренебрегают, надеясь на выравнивание последних за счет некоторой вытяжки материала, т. е. своего рода «самокорректировки» геометрии оболочки. Материал считается либо недеформируемым, либо нерастяжимым, что соответствует гипотезам I и II о свойствах материалов, приведенным в табл. 2, где эти свойства расположены в порядке от наибольшей идеализации (гипотеза I) к наибольшей реальности (гипотеза V).

Таблица 2. Гипотезы о свойствах материалов оболочек

Гипотеза	Свойства материала	Модули деформации		Гипотеза	Свойства материала	Модули деформации	
		$E_{\text{раст}}$	$E_{\text{сж}}$			$E_{\text{раст}}$	$E_{\text{сж}}$
I	Недеформируем	∞	∞	IV	Нелинейно упруг	$f(\sigma)$	0
II	Нерастяжим	∞	0	V	Нелинейно упруго-вязок	$f(\sigma, t)$	0
III	Линейно упруг	const	0				

Гипотеза I отличается наибольшей простотой. Она полностью соответствует традиционно сложившимся представлениям о тонких оболочках и поэтому дает возможность использовать весь арсенал формул безмоментной теории оболочек. На первых порах становления пневматических конструкций эта гипотеза была очень популярна, в особенности при определении усилий от избыточного давления воздуха, когда оболочка особых формоизменений не претерпевала.

Однако при действии нагрузок, вызывающих заметные перемещения и тем более сжатие (сморщивание) оболочек, эта гипотеза не годилась. Ее пришлось заменить гипотезой II, которая позволяет рассматривать оболочки со значительными изменениями формы вследствие образования складок и морщин, т. е. возникновения зон одноосного напряженного состояния. Расчет пневматических конструкций с использованием гипотезы II ведется на практике в два этапа. Сначала определяют каким-либо упрощенным способом вид оболочки, изменившийся под действием внешних сил, затем, исходя из условий равновесия, находят растягивающие усилия.

Дальнейшее приближение к реальным свойствам материала делает гипотеза III. Она учитывает его растяжимость. Это существенно усложняет расчет, делая необходимым привлечение аппарата математического анализа. К еще большему усложнению приводит учет анизотропии материала. Дальнейшее уточнение физиче-

ских свойств материала влечет за собой сужение перечня решенных задач как в отношении геометрии оболочек, так и в отношении характера нагрузок.

Гипотеза IV учитывает нелинейный характер связи между усилиями и деформациями, свойственный материалам с текстильной основой. Математические трудности при этом, естественно, возрастают.

Известно, что физико-механические свойства синтетического волокна — силовой основы материала оболочки — со временем изменяются. Гипотеза V учитывает процесс снижения модуля деформации материала в результате ползучести и старения (ультрафиолетовой деструкции). Эту гипотезу пока еще никто всерьез не использовал. Не совсем ясно, как включить указанные явления в расчетный аппарат. Однако не учитывать их вовсе нельзя, и поэтому сейчас ограничиваются введением в физические константы материала соответствующих редуционных коэффициентов: длительной прочности ($K_{\text{дл}}$) и старения ($K_{\text{ст}}$), связывая их с «рабочим стажем» оболочки¹.

Итак, в теории мягких оболочек сложилась следующая ситуация: математическая теория не без оснований доказывает некорректность и даже несостоятельность своей ветви — элементарной теории, но не дает при этом решения практических задач. Конструкторские бюро и проектные организации часто вынуждены пользоваться формулами элементарной теории, покрывая ее «неточность» коэффициентами запаса, достаточно высокими из-за неопределенности нагрузок, непостоянства физико-механических свойств материала, не совсем достоверной расчетной схемы и др.

Создавшееся положение энергично стимулировало разработку новых практических методов расчета мягких оболочек с использованием ЭВМ.

В последние годы в практику расчета пневматических конструкций (особенно воздухоопорного типа) внедряется метод конечных элементов (МКЭ). Хотя он и основан на фундаментальных принципах механики, его рабочий аппарат имеет сравнительно мало общего с методами классической теории оболочек. Своим рождением он обязан машинной математике, позволяющей более широко заменять континуальные задачи дискретными. МКЭ интенсивно разрабатывается во многих странах. Его практическое применение, особенно эффективное при использовании ЭВМ высокого класса, становится обычным при расчете уникальных (как по форме, так и по размерам) пневматических сооружений.

Метод предусматривает расчленение поверхности оболочки на множество трех- или четырехугольных элементов конечных размеров, поведение которых при воздействии на них избыточного давления воздуха и внешних нагрузок (или перемещений) может быть

¹ Нормативным документом СН 497-77 [10] предусмотрены следующие значения коэффициентов к нормативному сопротивлению материалов оболочек: $K_{\text{дл}} = 0,7$ и $K_{\text{ст}} = 0,5$.

запрограммировано для расчета на ЭВМ. Дискретизация задачи состоит в замене плавной поверхности оболочки граненой, а распределенной нагрузки — сосредоточенной, приложенной к каждому элементу. Каждая грань является элементом конечных размеров, что, собственно, и определило название метода. Чем мельче плоские элементы граненой поверхности, тем она ближе к реальной гладкой поверхности мягкой оболочки. С этой же целью некоторые исследователи заменяют плоские элементы пространственно изогнутыми.

После приложения нагрузок вся система конечных элементов, соответствующая исходной (раскройной) форме оболочки, оставаться в равновесии, естественно, не может. Для достижения нового равновесного состояния все узлы системы должны совершить необходимые перемещения. Эта задача в соответствии с программой решается последовательными приближениями с помощью ЭВМ.

Впервые для расчета пневматических конструкций МКЭ применили Дж. Оден и В. Кубитца [11]. Дальнейшее развитие метода получило отражение в работах Ч. Ли и Дж. Леонарда [12], Ч. Ли и Н. Сриваставы [13], В. Н. Кислоокого [14] и особенно авторов статей настоящего сборника — К. Ишин, Э. Хауга, М. Майовецки и Дж. Тирони, работы которых отличаются практической направленностью.

Техническая¹ теория [15], представляющая собой своеобразный компромисс между математической и элементарной теориями, успешно разрабатывается в СССР, и перечень решаемых с ее помощью задач (имеется в виду разнообразие геометрии оболочек и видов нагрузки) непрерывно расширяется. Методологическая основа технической теории есть расчленение деформированного состояния оболочки на два — основное и дополнительное — с последующим наложением малых перемещений, определенных при дополнительном состоянии, на деформированную оболочку при основном состоянии. Геометрия основного состояния полагается известной, а усилия при этом — определенными по элементарной теории. Уравнения равновесия дополнительного состояния, полученные на основе принципа возможных перемещений, линеаризованы. Проф. В. И. Усюкиным² с сотрудниками были составлены алгоритм и программа для ЭВМ.

Первый ощутимый результат расчета по технической теории был получен в работе [16], правда, только для наиболее простого случая загрузки (избыточного давления воздуха) полуцилиндрической оболочки со сферическими окончаниями (рис. 9). Это решение интересно тем, что оно пролило свет на характер поля напряжений вдоль стыка цилиндрической части оболочки со сфе-

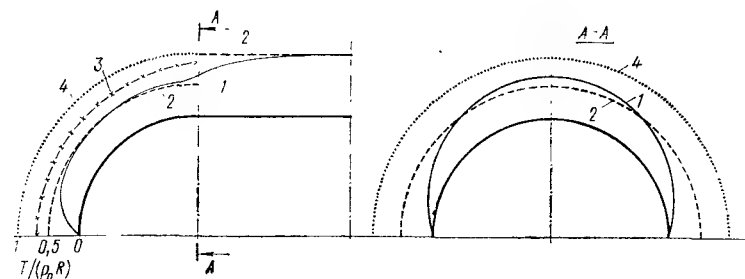


Рис. 9. Усилия в полуцилиндрической оболочке со сферическим окончанием

1 — кольцевые, определенные по технической теории (по Р. Г. Борсову); 2 — кольцевые, определенные по элементарной теории; 3 — максимальные главные, определенные по технической теории (по В. П. Колаеву); 4 — линия прочностных возможностей оболочки

рической и по опорному контуру. Однако оказалось, что значения максимальных усилий мало отличаются от значений, найденных с помощью формул элементарной теории. Расчет на нагрузки, вызывающие не только деформации, но и перемещения, оказался более сложным. Односторонняя снеговая нагрузка или ветровое давление приводят к возникновению зон одноосного напряжения и, как следствие, — к необходимости перестройки алгоритма и программы.

Трудности, порой непреодолимые, математического анализа поведения пневматической конструкции под нагрузкой заставляют использовать некоторые допущения, упрощающие расчет. Правомочность их обосновывается в каждом отдельном случае в соответствии с конкретными условиями работы рассматриваемой конструкции. Наиболее существенные упрощения, как уже отмечалось, достигаются при идеализации физических свойств материалов оболочек.

Другие допущения касаются нагрузок, в первую очередь ветровых. Известно, что картина распределения ветрового давления по поверхности оболочки, связанной с основанием, аналитического выражения не имеет, хотя первая попытка решения этой задачи применительно к цилиндрической пневматической оболочке воздухоопорного типа была предпринята сотрудниками университета в Киото [17]. Поэтому при расчетах пользуются данными продувок в аэродинамической трубе, которые зависят не только от формы оболочки, но и от многих других факторов — ситуации, гладкости поверхности оболочки и (это особенность воздухоопорных оболочек) от соотношения $\psi = p/q$ (где p — внутреннее давление воздуха под оболочкой, q — скоростной напор). Все это придает результатам аэродинамических продувок весьма индивидуальный характер, тем более что от значения ψ зависит не только интенсивность ветрового давления, но и его направление, поскольку оно всегда нормально к поверхности, а поверхность перемещается и изменяет свою форму тем заметнее, чем меньше ψ .

¹ Термины «математическая», «техническая» и «элементарная» теории являются условными. Они не определяют точно суть теорий и их не следует понимать буквально.

² См. статью В. И. Усюкина в настоящем сборнике.

Более или менее обобщенную эпюру распределения ветрового давления иногда пытаются представить эмпирическими формулами, причем достижение лучшей аппроксимации приобретает цену растущей громоздкости формул. Обратный процесс — упрощение эпюры давления ветра — и есть следующий этап в серии допущений, направленных на облегчение математических выкладок. Сложная эпюра ветрового давления заменяется более простой, представляемой двух- и одночленными тригонометрическими формулами или даже ступенчатой эпюрой. Анализируя напряженно деформированное состояние цилиндрической оболочки под действием ветра, Э. У. Росс [18] установил, что на конечном результате расчета максимальных усилий в оболочке упрощение картины распределения ветрового давления отражается мало, чего нельзя сказать о перемещениях.

Некоторое упрощение расчета может быть достигнуто путем замены вертикального направления действия снеговой нагрузки на нормальное к поверхности оболочки. Учитывая тот факт, что основная масса снега отлагается лишь на «макушке» купола или свода, где угол между вертикалью и нормалью невелик, а также то, что интенсивность снегового покрова резко уменьшается с удалением от вершины, такое упрощение может быть допущено.

Наконец, следует отметить еще одно допущение, о котором умалчивают обычно все без исключения теории. Это — пренебрежение ужесточающим действием заводских и монтажных швов, которые оказывают весьма существенное влияние на форму оболочки, испытывающей избыточное давление воздуха. Швы придают оболочке дополнительные свойства своего рода «конструктивной ортотропии». Например, меридионально скроенная сферическая оболочка из-за ужесточающего влияния швов деформируется в широтном направлении заметнее, чем в меридиональном, приобретая вид геоида даже тогда, когда модули деформации материала в обоих направлениях одинаковы. По этой же причине горизонтальные (широтные) сечения оболочки приобретают некоторую гофрированность. Представляя собой элементы местного усиления оболочки, швы могут сыграть отрицательную роль концентраторов напряжений в материале.

Перед проектировщиками, сотрудниками КБ заводов-изготовителей, конструкторами и другими специалистами, выполняющими проектирование пневматических конструкций, в первую очередь возникает вопрос о выборе материала мягкой оболочки исходя из требуемой прочности. В конечном счете проектировщиков интересуют величины максимальных растягивающих усилий, развивающихся в оболочке под действием наивыгоднейшей комбинации расчетных нагрузок.

Что касается сооружений рядовых, т. е. воздухоопорных оболочек сферической или цилиндрической формы сравнительно небольших пролетов (до 50 м), то для их расчета нормы проектирования многих стран, равно как и отдельные авторы, рекомендуют простые формулы вида

$$T = \alpha p R + \beta q R, \quad (1)$$

где T — погонное усилие в оболочке по каждому из главных направлений; p — избыточное давление воздуха под оболочкой; q — скоростной напор ветра; α , β — коэффициенты, значения которых устанавливаются методами элементарной или какой-либо другой уточненной теории.

Усилия, найденные по формуле (1), являются наибольшими из всех действующих по площади оболочки и должны представлять собой своего рода огибающую поверхность поля усилий, определенного другими, более точными методами. Такой же вид имеют эмпирические формулы усилий на контуре оболочек, на которые рассчитываются анкерные устройства. В табл. 3 и 4 приведены значения коэффициентов β максимальных усилий в оболочках, принятые нормами некоторых стран¹.

Таблица 3. Коэффициенты β в формулах меридиональных T_M и кольцевых T_K усилий в сферических оболочках и сферических окончаниях цилиндрических оболочек

Нормы	Значения β для усилий							
	$T_M = 0,5pR + \beta qR$ при H/R				$T_K = 0,5pR + \beta qR$ при H/R			
	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	1,5
A	—	1,0	1,3	1,75	—	1,0	1,3	1,75
B	0,7	—	1,3	1,70	0,7	—	1,3	1,70
C	1,3	1,4	1,5	—	1,0	1,1	1,2	—

Примечание. A — нормы Великобритании [21], Канады [22] и Италии [23]; B — нормы Японии [24]; C — нормы ФРГ [20].

На рис. 10 дано сравнение усилий в полумеридиональной оболочке со сферическими окончаниями (рис. 11) от совместного действия внутреннего давления и ветра, определенных методом конечных элементов [19] и, для сравнения, по нормам ФРГ [20]. Обращает на себя внимание «всплеск» меридиональных усилий на стыке сферического и цилиндрического участков оболочки, зафиксированный расчетом по МКЭ. Элементарная теория обнаружить это, естественно, была не в состоянии.

Завершая рассмотрение существующих методов расчета пневматических оболочек и путей их развития, необходимо остановиться на двух общих вопросах: точность расчета и форма постановки задачи о прочности оболочки.

1. После принятия любого из перечисленных выше допущений теряется формальное право считать результаты расчета точными. Каждое допущение как бы снижает на одну ступень точность рас-

¹ Отметим заметный разброс значений коэффициентов β , рекомендуемых нормами разных стран. В настоящее время действующая в рамках ИАСС (Международная ассоциация по пространственным конструкциям) рабочая группа по пневматическим конструкциям (председатель проф. И. Цубой, Япония) разрабатывает международные нормы, где эти коэффициенты будут унифицированы.

Таблица 4. Коэффициенты β в формулах меридиональных T_M и кольцевых T_K усилий в цилиндрической части цилиндрических воздухоопорных оболочек

Размеры оболочек		Значения β для усилий					
H/R	L/B	$T_M = 0,5pR + \beta qR$ по нормам			$T_K = pR + \beta qR$ по нормам		
		A	B	C	A	B	C
1,5	1,33	1,6	1,6	—	1,25	1,0	—
	2,0	1,5	1,5	—	0,9	1,0	—
	2,67	1,5	—	—	0,8	1,0	—
	4,0	1,5	1,5	—	0,75	1,0	—
1,0	1,33	1,3	1,3	1,2	0,9	1,0	1,0
	2,0	1,4	1,4	1,2	0,8	1,0	1,0
	2,67	1,5	—	—	0,8	—	—
	4,0	1,75	1,8	1,3	0,8	1,0	1,1
0,75	1,33	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9
	2,0	1,3	1,3	1,2	0,9	1,0	0,9
	2,67	1,6	—	—	0,9	—	—
	4,0	2,3	2,3	1,3	0,9	1,0	1,0
0,5	1,33	—	—	1,1	—	—	0,7
	2,0	—	—	1,2	—	—	0,8
	4,0	—	—	1,3	—	—	0,9

Примечание. А, В, С — то же, что в табл. 3.

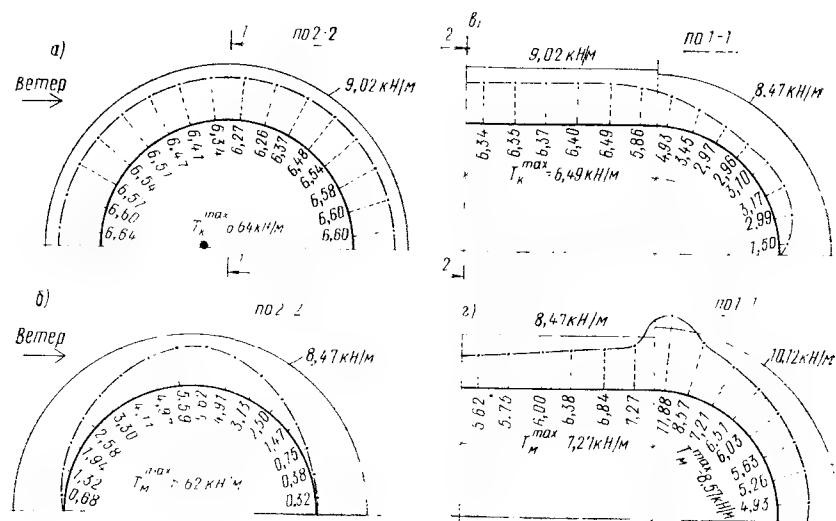


Рис. 10. Усилия в оболочке от совместного действия внутреннего давления воздуха $p=0,3$ кПа и скоростного напора ветра $q=0,5$ кПа, определенные по МКЭ (штрихпунктирные линии) и по формулам норм ФРГ (сплошные линии)

а, б — поперечные сечения в середине длины оболочки; в, г — продольные сечения оболочки

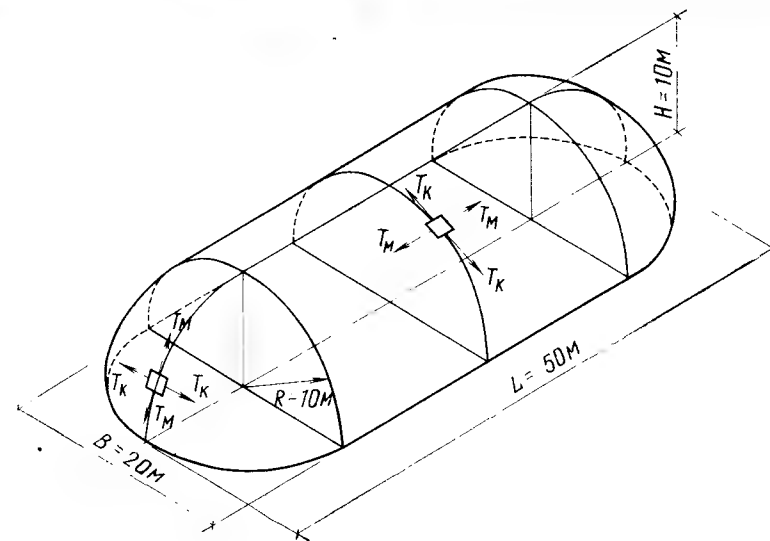


Рис. 11. Схема полуцилиндрической оболочки к рис. 10 и табл. 3 и 4.

чета. Однако понятие «точный расчет», как всегда, проблематично или по крайней мере относительно. Поэтому каждый отказ от упрощения или допущения есть шаг к достижению истины. Но поскольку абсолютной истины, как и абсолютно точных расчетов, не существует, то за относительную истину часто берут результаты приближенных расчетов по элементарной теории. Сравнивая с ними результаты своих уточненных расчетов, исследователь обычно дает понять, на сколько процентов ошибается элементарная теория, но не может подсчитать, на сколько процентов неверен его результат по сравнению с точным расчетом, коль скоро таковой отсутствует.

Уместно поставить практический вопрос о «достаточной» точности расчета. Классическим критерием точности служит сходимость с результатами эксперимента. Но последний не всегда осуществим и не всегда убедителен.

Мерилом степени «разумной точности» расчета может служить точность входящих в расчет параметров (например, физические константы материала, величина и характер нагрузок), выше которой точность расчета становится бессмысленной. Поэтому, если отбросить интересы «чистой» теории, то уровень решения должен соответствовать уровню задания.

2. Вопрос о форме постановки задачи о прочности оболочки, о внутреннем смысле этой задачи, более сложен.

В той или иной мере теория позволяет найти место (или места) наибольших усилий в оболочке и определить их величину. Учитывая, что толщина материала оболочки постоянна, а следовательно, неизменна и прочность по всей ее поверхности, можно ожидать, что

места наибольших усилий и явятся теми местами, где наиболее вероятен разрыв оболочки.

Однако изучение многочисленных аварий воздухоопорных сооружений показывает, что формой их разрушения является не разрыв оболочки, как следовало бы ожидать, а ее раздир. При этом место начала раздира, как правило, не совпадает ни с одним из мест наибольших растягивающих усилий, найденных в результате расчета.

Все это говорит о том, что «модель разрушения» оболочки, базирующаяся на ожидании ее разрыва в месте максимального натяжения, не соответствует действительности. Вероятно, эта модель должна быть построена в более полном соответствии с фактической картиной разрушения оболочки ветровым воздействием.

Местами, откуда обычно начинается раздир оболочки, бывают: опорный контур, линии сопряжения с жесткими конструкциями (каркасами шлюзов, примыкающими сооружениями и т. п.), места резкого нарушения плавности поверхности, разнообразные вырезы (особенно незакругленные), рабочие и монтажные швы. Причинами первичного раздира могут быть также ошибки, допущенные при проектировании, раскрое, изготовлении и монтаже оболочек. Зачастую раздиром завершается порез или прокол оболочки острыми предметами, находящимися внутри помещений, с которыми она соприкасается при колебаниях под действием ветра.

Короче говоря, разрушение оболочки происходит по причинам, не учитываемым при разработке методов расчета. От разрушения ее спасают высокие коэффициенты запаса (отношение кратковременной прочности к расчетному сопротивлению или допускаемому напряжению), приведенные в табл. 5.

Таблица 5. Коэффициенты запаса материала оболочек

Страна	СССР [10]	Великобритания [21]	Япония [24]	ФРГ [20]	ГДР [24]	США [26]
Коэффициент запаса	3,5—4	4	2,5—3,5	5	5	4

Так как оболочка разрушается, как правило, в так называемых «нерасчетных случаях», т. е. в случаях, по сути дела, не предусмотренных методиками расчета, то возникает противоречие: оболочки разрушаются в тех случаях, которые считаются «нерасчетными», а теория мягких оболочек оттачивает свой аппарат для рассмотрения таких ситуаций, которые для оболочек не являются роковыми.

Можно прийти к выводу, что задача о прочности оболочки ставится конструкторами неточно или по крайней мере неполно. Из нее выпадает весьма существенный аспект — учет возможности концентрации напряжений, приводящих к раздиру.

Раздир оболочки чем-то напоминает разрушение конструкции из жесткого материала в результате концентрации напряжений. Воз-

можно, методика расчета мягких оболочек сейчас стоит перед необходимостью познания этого явления, так же как в свое время, в начале нынешнего века, наука о прочности металлических конструкций стояла перед непознанным явлением разрушения их от концентрации напряжений.

Очевидно, сейчас наступило время, когда понятие о прочности материала мягких оболочек не должно ограничиваться отдельными показателями его прочности при разрыве и при раздире, получаемыми в результате стандартных испытаний маломерных образцов. Вероятно, их придется заменить каким-то другим показателем, где явления разрыва и раздира будут совмещены в пропорциях, соответствующих реальным условиям работы оболочки. Возможно, удастся создать некий обобщенный показатель прочности, основываясь на корреляции, которая существует между предельными прочностями при разрыве и раздире.

Будущее. В недалеком будущем, несомненно, будут решены все те основные проблемы, о которых речь шла выше, равно как и менее кардинальные, которые неизбежно возникают при решении основных.

Будут созданы материалы — высокопрочные и долговечные, негорюемые, тепло- и морозостойкие, недорогие и технологичные. Будут разработаны совершенные системы воздухоподачи, полностью исключающие возможность падения давления воздуха под оболочкой по любой причине. Будет создано оборудование, позволяющее управлять температурно-влажностным режимом под оболочкой, используя солнечную энергию.

Все это не только значительно расширит область применения пневматических конструкций в строительстве за счет ограничения определенных сфер господства капитальных сооружений из традиционных, жестких материалов, но и приведет (что, пожалуй, гораздо важнее) к возникновению новых областей использования воздухоопорных сооружений, недоступных сооружениям традиционным.

Перспективы развития пневматических строительных конструкций определяются двумя главными свойствами, присущими оболочкам воздухоопорного типа: возможностью перекрытия больших пролетов и больших площадей и возможностью изоляции подоболочечного пространства от окружающей среды.

Следует прямо сказать, что до тех пор, пока размеры воздухоопорных оболочек соизмеримы, а функции сопоставимы с размерами и функциями обычных зданий, пневматические сооружения часто выглядят неполноценными заменителями последних. Но если размеры пневматических оболочек смогут стать такими, что под ними можно разместить город, агропромышленный комплекс, открытую разработку полезных ископаемых, крупный район строительства, когда под оболочками, смонтированными в арктической или тропической зонах, можно создать умеренный искусственный климат, то они становятся в ряд таких достижений строительной техники, которые доступны только воздухоопорным сооружениям и

где никакие другие конструкции соперничать с ними не смогут. Технические достижения открывают такие перспективы, которые не могут не иметь социальных последствий.

Архитектор А. Квормби [27] прямо так и пишет: «Я убежден, что пневматические конструкции являются самым важным открытием, когда-либо сделанным в области архитектуры, что они смогут освободить жилую среду от скованности и могут сыграть существенную роль в развитии общества».

Проблема перекрытия больших пролетов — одна из «вечных» проблем строительного искусства. Однако, если не рассматривать мостостроение, оставив только покрытия, то вопрос о предельных пролетах переходит из плана технических возможностей в план целесообразности. До настоящего времени этим пределом служил размер покрытия над стадионом с трибунами до 100 тыс. зрителей, который составлял максимум 200×300 м.

Нужда и в других, более крупных покрытиях, по всей вероятности, может возникнуть в связи с новой задачей — изоляцией под оболочечной атмосферы от внешней, созданием искусственного климата. И именно этот аспект, возможно, определит направление дальнейшего развития воздухоопорных сооружений.

Пролеты пневматических сооружений были ограничены прочностью материалов оболочек лишь до тех пор, пока не появились воздухоопорные конструкции, усиленные канатами и сетями. Тогда основные усилия, которые воспринимали сами оболочки из тканей или пленок, оказалось возможным передать тросам, несущая способность которых практически неограничена. Результаты не замедлили сказаться. На рис. 12 показан непрерывный рост пролетов оболочек, усиленных канатами, на фоне стабилизовавшихся размеров оболочек без усиления, достигших, очевидно, своего экономически рационального предела 50—70 м. Пролет 168 м оболочек, усиленных канатами, на сегодня рекордный, но далеко не предельный. Разработано много проектов оболочек гораздо больших пролетов. Наиболее грандиозным и в то же время солидно обоснованным выглядит получивший широкую известность проект оболочки над городом в Арктике, выполненный интернациональной бригадой под руководством проф. Ф. Отто (ФРГ). Город на 20 тыс. жителей располагается под светопроницаемым куполом диаметром 2 км и высотой 240 м. Силовой основой оболочки служат канаты диаметром 270 мм из полиэфирного волокна с гарантированным сроком службы 100 лет. Двухслойная оболочка поддерживается избыточным давлением воздуха всего лишь 250 Па. Современное состояние химии полимеров и технологии позволяет считать этот проект осуществимым в наши дни.

Говоря о больших (или сверхбольших) пролетах, приходится различать две стороны этой задачи — техническую возможность и экономическую целесообразность. Есть ли смысл перекрывать единым пролетом в несколько сотен метров столь большой объект, как, например город или агропромышленный комплекс?

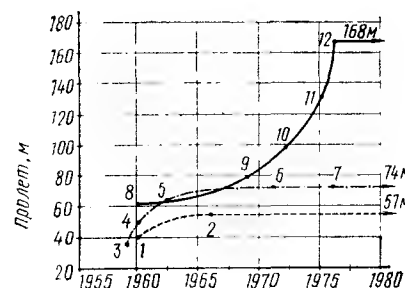


Рис. 12. Рекордные пролеты оболочек воздухоопорного типа (сплошные линии — пологие с канатным каркасом; штрихпунктирные — сферические без каркаса; штриховые — цилиндрические без каркаса)

1 — выставка, США; 2 — кегельбан, Япония; 3 — экспериментальное сооружение, СССР; 4 — выставка, США; 5 — укрытие антенны, США; 6 — спортзал, Финляндия; 7 — выставка, СССР; 8 — зерносклад, США; 9 — выставка, Япония; 10 — экспериментальное сооружение, Франция; 11 — спортзал, США; 12 — стадион, США

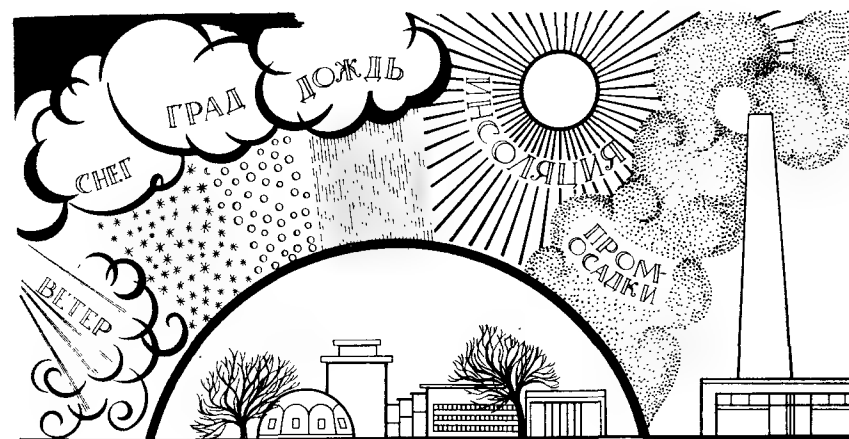


Рис. 13. Изоляция подоболочечного пространства от окружающей среды

Ведь эта задача может быть решена и по-другому, более экономично, если использовать оттяжки, заанкеренные в грунт. Редко расположенные (например, через 100 м) оттяжки не будут существенной помехой ни в том, ни в другом случае. Таким образом можно перекрывать площади неограниченных размеров.

Градостроительство. Пневматические оболочки, по своей природе воздухопроницаемые, изолируют перекрываемое пространство от окружающей атмосферы (рис. 13). Когда оболочки становятся столь большими, что под ними можно расположить целый город, то он оказывается защищенным от атмосферных воздействий — ветра, осадков, колебаний температуры и ее коварных переходов через нуль. Инсоляция становится контролируемой и даже регулируемой. Полное исключение одних и смягчение других факторов позволяют существенно облегчить и удешевить ограждающие и несущие конструкции зданий, стоящих под оболочкой.

Воздухоопорная оболочка громадных размеров перестает быть зданием. Она перерастает масштабы моноструктуры и становится своего рода диафрагмой, отделяющей пространство с естественным

климатом от пространства с искусственным климатом. Она отделяет от внешней среды уже не человека, как это делает дом, а поселение человека, его дома. И поэтому к домам, укрытым оболочкой, не приходится предъявлять привычные и кажущиеся вечными и неизбежными требования теплоизоляции, непротекучести и непроемкости. Остаются требования только звукоизоляции. Крыши, которые не будут знать ни ливней, ни снегопадов, станут совсем другими, утратив функции гидроизоляции и водоотвода. Несущая конструкция здания, его остов, освобожденный от ветровых и снеговых нагрузок, станет предельно легким.

Дождевые и талые воды, стекающие не с грязного асфальта дорог и тротуаров, а с чистой оболочки, можно будет разумно использовать, облегчая решение назревающей проблемы нехватки пресной воды¹. Ливневая канализация становится ненужной. Исключаются расходы на очистку улиц от снега, а они не так уж малы. Например, в Москве каждую зиму снегоуборкой заняты около 1500 автомобилей; только транспортные расходы достигают 5—6 млн. руб. в год.

Воздух под куполом можно будет обеспыливать, увлажнять или осушать, охлаждать или подогревать. Промышленный дым не сможет попадать в легкие горожан, явление «смога» исключается². Отопление города становится более экономичным, поскольку суммарная теплоотдающая поверхность отопляемых зданий превышает площадь теплоотдачи оболочки примерно в 50 раз. Общие потери тепла, по данным Р. Б. Фуллера, сокращаются в 10 раз.

Изучение теплотехнических аспектов проблемы укрытия городов воздухоопорными оболочками вызывает у исследователей интересную ассоциацию. Если жаровня в гондоле монгольфьера, подогревая воздух в шаре, придавала ему нужную подъемную силу, то не будет ли воздух, подогреваемый всеми домами города, тоже обладать подъемной силой, достаточной для того, чтобы поддерживать оболочку, их покрывающую? Не суть ли наши города — гигантские жаровни, где каждый дом — уголек, подогревающий окружающий воздух? Может быть, покрывая город пленкой, можно будет по крайней мере зимой обойтись без воздухонагнетательных установок? Может быть, возможно при этом держать въезды под оболочку постоянно открытыми, не заботясь о шлюзовании?

¹ Решением Генеральной Ассамблеи ООН период с 1981 по 1990 годы объявлен «десятилетием питьевой воды».

² Нерадостные перспективы дальнейшего загрязнения городов рисует фирма Хауз-Руккер, представившая на выставке «Укрытие — выживание в загрязненной среде» экспонат — жилой дом на одну семью, покрытый защитной оболочкой воздухоопорного типа: «Города погребены под пологом смога. Пыль, которую глотают горожане, может измеряться грузовиками. Улицы превратились в газовые камеры, реки — в вязкую отравленную бурду. Солнце превратилось в 40-ваттную лампочку... Несмотря на массовые кампании против загрязнения окружающей среды, непрерывность процесса и постоянное привыкание мешают инстинктивному стремлению предотвратить увеличивающуюся опасность. Смерть от окружающей среды не придет так внезапно, как от водородной бомбы, но финал такой же» [28].

Сельское хозяйство. Возможность перекрытия воздухоопорными оболочками крупных агропромышленных угодий открывает захватывающие перспективы развития сельского хозяйства нового типа.

Использование парникового эффекта, управление влаготермическим режимом средствами регулирования инсоляции и испарения влаги, создание искусственной атмосферы с благоприятным для растений химическим составом — все это может быть направлено на сокращение вегетационного периода сельскохозяйственных культур, получение нескольких урожаев в год, освоение аридных земель.

Канадские специалисты [29] на примере своих южных провинций, расположенных между 50 и 60° северной широты¹, считают, что если ранней весной, еще до начала таяния, на поле установить оболочки, то пахота и сев могут быть начаты на 4—6 недель раньше благодаря ускорению таяния снега и оттаиванию грунта под оболочкой. Снятые после завершения посевной кампании оболочки могут быть снова установлены в конце лета для обеспечения созревания урожая, а также для защиты уборочных работ от дождя и снега.

Возможность изменения химического состава атмосферы под оболочкой открывает пути получения не только частых, но и богатых урожаев. Советские ученые В. Ковда и В. Кунин [30] приводят данные, что масса растений, выращиваемых в среде, где насыщение углекислым газом в восемь раз превышает его содержание в атмосфере, увеличивается более чем в пять раз. Урожай сорго, например, вырос в три раза, а урожай риса составил 189 центнеров на гектар. При этом дешевым источником обогащения среды углекислым газом могут быть профильтрованные выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания.

С другой стороны, обеднение кислородом атмосферы под оболочкой малых размеров (хранилища) может превратиться в средство предотвращения порчи сельскохозяйственной продукции. Английские специалисты [31] установили, что если прекратить подачу воздуха в пневматическое хранилище, наполненное зерном, то вредители погибают от недостатка кислорода. При уменьшении воздухопроницаемости оболочки до 0,2 % становится возможным хранение в неветилируемых складах сырого зерна.

Свойство оболочки конденсировать на своей внутренней поверхности влагу позволяет развивать земледелие на бесплодных береговых песках южных морей (например, Каспийского). Для этого под оболочку подводится морская вода, которую солнце превращает в пресный конденсат. Экспериментальная проверка такой системы опреснения и выращивания овощей организована в арабском эмирате Абу-Даби на площади 2 га [32].

¹ Соответствует полосе европейской части СССР между широтами соответственно Харькова и Ленинграда.

Перспективы создания искусственного климата не ограничиваются микроклиматом под оболочкой. Пневматические конструкции способны решать климатические задачи грандиозного масштаба.

Известно, что горы определяют климат прилегающих областей. Искусственные горы из пленок, наполненных воздухом, могли бы изменить климат местности. Японская фирма «Тайо Когю» предполагает в безводной пустыне Саудовской Аравии установить надувной горный хребет длиной 10 км и высотой 600 м, задерживающий влажные морские ветры. Поднимаясь по хребту, пар охлаждается, превращается в облака и проливается дождем на сухую землю.

Успешное завершение этого эксперимента делает возможным «исправление» климата целых областей сравнительно недорогими средствами — ведь горы будут состоять из воздуха!

Строительство. Сейчас нередко примеры использования пневматических оболочек в качестве строительных тепляков, под которыми выполняют не только отдельные виды строительных работ — бетонные, кровельные, сварку, — но и монтаж двух- и трехэтажных зданий. Недалек тот день, когда воздухоопорные оболочки смогут перекрыть не отдельные постройки, а строительные площадки жилых, общественных или промышленных комплексов (рис. 14). Более того, оболочками могут быть закрыты и такие громадные площади, как районы открытых разработок полезных ископаемых (рис. 15). Это особенно необходимо в районах с суровым климатом, например в Заполярье. Под оболочкой всегда будет тепло, безветренно, сухо, не будет ни дождя, ни снега, ни распутицы. Люди смогут работать и жить независимо от сезона и погоды в любых географических районах.

Использование солнечной энергии. Будущее воздухоопорных зданий рисуется в неразрывной связи с использованием солнечной энергии. Принцип теплоизоляции, широко используемый в теплотехнике зданий с ограждающими конструкциями из традиционных материалов, для пневматических сооружений неприменим. Нет нужды соперничать с капитальными зданиями в создании эквивалентного термического сопротивления, когда оболочка воздухоопорного здания сама по себе представляет солнечный коллектор громадной площади.

При соответствующем расположении отдельных мембран, составляющих двух-, трех- или многослойную оболочку, ее можно превратить в низкотемпературную гелиоустановку типа «горячий ящик» площадью в несколько сотен квадратных метров, температура в котором может достигать до 80°C . В летний полдень на широте Москвы при безоблачном небе мощность теплового потока солнечной радиации равна 577 Вт/м^2 [33]. Это значит, например, что на сферическую оболочку диаметром 30 м солнце изливает тепловой поток мощностью около 400 кВт.

Разработанные в настоящее время проекты пневматических сооружений, где в той или иной мере используется солнечная энергия, можно рассматривать не больше чем первые попытки реали-

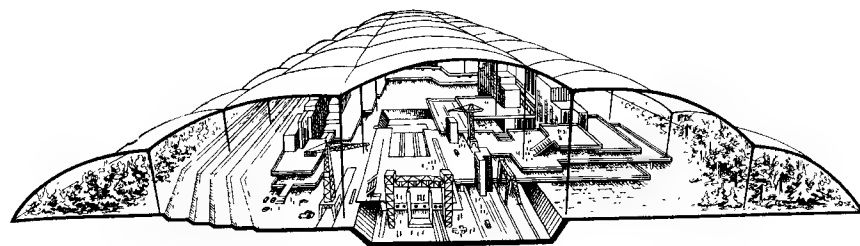


Рис. 14. Строительство промышленного комплекса под оболочкой с оттяжками

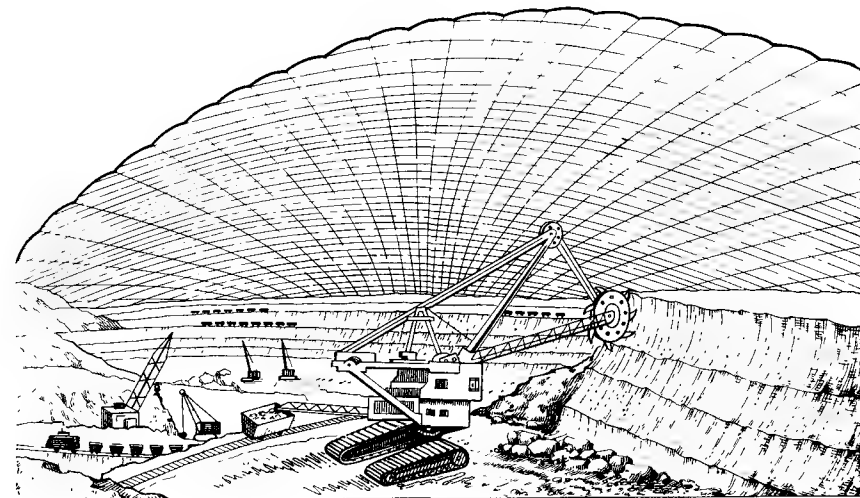


Рис. 15. Открытая разработка полезных ископаемых под оболочкой, усиленной канатами

зации уникальных возможностей, предоставляемых оболочками для этой цели.

Успешное решение проблемы использования солнечной энергии в пневматических сооружениях в значительной степени зависит от термооптических характеристик мембранных материалов. Можно ожидать, что значения коэффициентов отражения, поглощения и пропускания у материалов будущего смогут колебаться в очень широких пределах — от 5 до 90 %.

Рациональное комбинирование отражающих, пропускающих и поглощающих слоев, а тем более трансформация мембран в зависимости от высоты солнца или от сезона, управление ими с помощью опять-таки пневматики позволит существенно повысить КПД системы использования солнечной энергии.

Воздухоопорные здания будущего представляются в виде сооружений, которые в условиях высокой солнечной радиации смогут в значительной (если не в полной) мере обеспечить энергети-

ческие нужды здания — подачу воздуха и его кондиционирование, освещение и горячее водоснабжение — за счет энергии солнца. Решение проблемы аккумуляции солнечной энергии еще более расширит возможности воздухоопорных зданий как солнечных коллекторов и позволит расходовать ее ночью и в пасмурные дни.

Акванавтика и комонавтика. Стабильность формы пневматической конструкции обеспечивается некоторым превышением внутреннего давления над внешним, независимо от абсолютных величин давлений. Это свойство с успехом используют для создания подводных надувных сооружений, соблюдая принцип уравнивания давлений, который лежит в основе устройства акваланга.

В 1964 г. Эдвин Линк (известный еще как изобретатель авиационного тренажера «кабина Линка», действующего на аэродинамическом принципе) погрузил в районе Багамских островов мягкий надувной подводный дом для двух акванавтов, пробывших в нем 49 ч на глубине 132 м. Первый в Европе подводный пневматический дом «Спрут» был испытан советскими акванавтами в 1967 г. [34]. В течение 14 суток он использовался под водой в качестве лаборатории. Модель оказалась удачной; ее модификации назывались «Спрут М» (1968) и «Спрут У» (1969). Так была доказана возможность замены тяжелых стальных подводных домов тканевыми оболочками.

Мягкие подводные сооружения допускают свободный выход акванавтов в воду для работы и возвращение в помещение без какой бы то ни было декомпрессионной процедуры, так как давление воздуха под оболочкой, в легочном автомате акваланга (на вдохе) и в легких человека одинаковы и равны давлению воды на любой доступной для акванавта глубине.

Подводные воздухоопорные здания могут быть сравнительно большими. Их размеры ограничивают только трудности противодействия всплытию. Наступающая эра интенсивного освоения океанского шельфа должна ознаменоваться широким использованием мягких оболочек для более или менее постоянной деятельности подводников (рис. 16).

Несколько иной представляется картина использования пневматических конструкций в космических исследованиях. Иной в том смысле, что если в подводной оболочке внутреннее давление должно быть достаточно высоким для того, чтобы противостоять давлению воды, то в условиях космического вакуума оно должно быть возможно низким, чтобы не перенапрягать оболочку (достаточно сказать, что даже при давлении дыхательной смеси, равном 80 % атмосферного, внутреннее давление на оболочку превышает в 100—200 раз обычное избыточное давление у «земных» воздухоопорных зданий).

Достаточно широко известен опыт применения очень тонких пленок для создания искусственных спутников серии «Эхо», наполняемых газом после выведения на орбиту. Однако, рассматривая объекты строительного характера, придется ограничиться конструкциями, предназначенными для обеспечения деятельности чело-

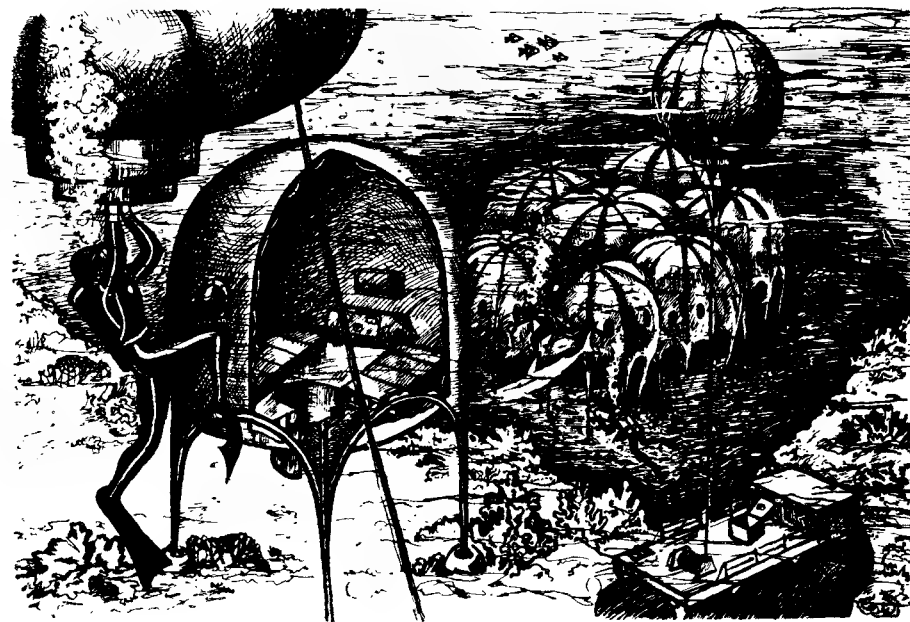


Рис. 16. Подводные пневматические сооружения

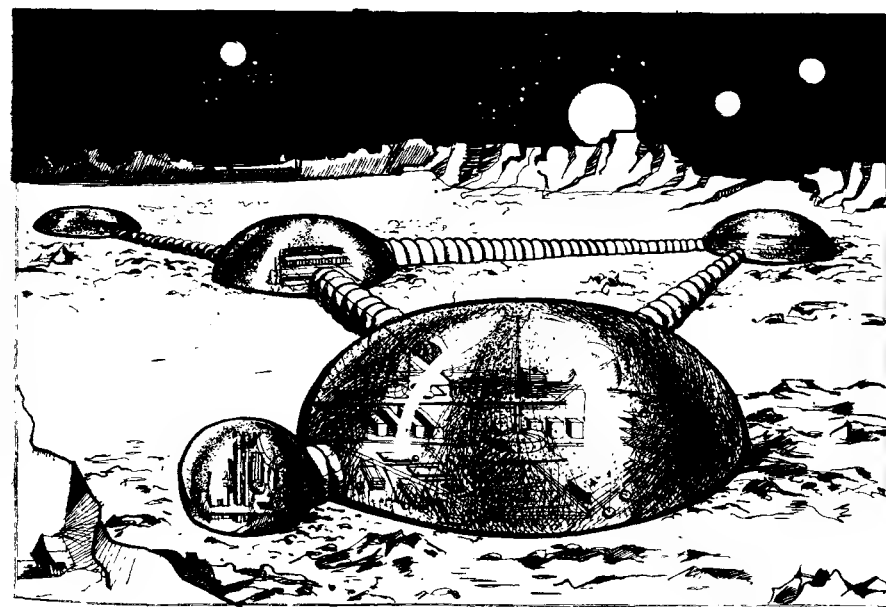


Рис. 17. Пневматические сооружения на планете

века на Луне и других небесных телах, лишенных атмосферы. Давление дыхательной смеси, несколько пониженное по сравнению с атмосферным, все же вызывает в оболочке высокие напряжения и требует применения материалов очень высокой прочности, даже при сравнительно малых поперечных сечениях конструкций. В принципе эти трудности преодолимы, и будущие поселения человека на Луне, а также на планетах не обойдутся без пневматических сооружений (рис. 17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelbrecht R. M. New boom in building. — Popular Sciences, March 1973.
2. Нardini, Бруно. Жизнь Леонардо. М., Планета, 1978.
3. Steel bubble roof is light, low cost and durable. — Engineering News—Record, 1979, v. 203, № 19.
4. Kawaguchi M., Abe M., Takeyama Y. Metal-membrane tension structures. World Congress on shell and spatial structures. — Proceedings, vol. 4. Madrid, 1979.
5. Study started on air-supported building roof that will use Sun to save energy. — Engineering News—Record, Oct. 23, 1975.
6. Алексеев С. А. Основы общей теории мягких оболочек. — В сб.: Расчет пространственных конструкций, 1966, вып. XI.
7. Алексеев С. А. Основы теории мягких осесимметричных оболочек. — В сб.: Расчет пространственных конструкций, 1965, вып. X.
8. Магула В. Э. Судовые эластичные конструкции. Л., Судостроение, 1978.
9. Магула В. Э. Основные зависимости теории мягких оболочек. — В сб.: Труды Николаевского кораблестроительного института, 1973, вып. 78.
10. Временная инструкция по проектированию, монтажу и эксплуатации воздухоопорных пневматических сооружений. СН 497-77.
11. Oden J. T., Kubitz W. K. Numerical analysis of nonlinear pneumatic structures. — Proceedings of the 1-st International colloquium on pneumatic structures. Stuttgart, 1967, p. 87—107.
12. Li C.-T., Leonard J. W. Finite element analysis of inflatable shells. — Proc. Amer. Soc. Civil Engrs, 1973, vol. 99, No EM3, p. 495—514.
13. Li C.-T., Srivastava N. K. Analysis of pneumatic shells with or without cable net; general finite-element formulation. — Computers and Structures, vol. 4, August, 1974.
14. Кислюкий В. Н. Исследование статики и динамики висячих, пневмонапряженных и комбинированных систем методом конечных элементов. — Строительная механика и расчет сооружений, 1977, № 4.
15. Усюкин В. И. Техническая теория мягких оболочек. Диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук (МВТУ им. Н. Э. Баумана). М., 1971.
16. Борсов Р. Г. Исследование напряженно деформированного состояния конструкций из мягких оболочек разностными методами. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук (МВТУ им. Н. Э. Баумана). М., 1976.
17. Kunieda H., Yokoyama Y., Arakawa M. Cylindrical pneumatic membrane structures subjected to wind. — Proc. Amer. Soc. Civil Engrs, 1981, vol. 107, No EM5, p. 851—867.
18. Росс Э. У. Большие прогибы надувного цилиндрического покрытия. — В сб.: Труды Американского общества инженеров-механиков, 1969, № 4.
19. Oelbermann J. Ausführung und Berechnung von luftgetragenen Hallen nach der geplanten DIN 4134 und nach der Methode der Finiten Elemente. — In: E. Bubner et al. Membran-Konstruktionen. Teil 1. Köln—Braunsfeld, 1979.
20. DIN 4134. Tragluftbauten; Berechnung, Ausführung und Betrieb. 1979.
21. Draft for development. Air-supported Structures. British Standard Institution. 1976.
22. Canadian Standards Association. Air-supported Structures. Third Draft. 1979.

23. Draft for recommendations for air-supported structures, prepared for A. C. I. S. A. Italia, 1980.
24. Japanese pneumatic structure design standard. 1970.
25. TGL 10728/03. Traglufthallen. 1976.
26. Minimum performance standard for single-wall air-supported structures. St. Paul, Minnesota. 1971.
27. Квормби А. Архитектор и пластмассы. М., Стройиздат, 1978.
28. Herzog, Thomas. Pneumatic structures. London, 1977.
29. Glockner P. G., Malcolm D. J. The use of inflatables in agriculture and the exploration industry. — International Symposium on air supported structures. Venice, 1977.
30. Ковда В., Куни В. Контролируемая среда для освоения пустынь. — Природа, 1970, № 6.
31. Farmbuildings, 1965, № 6.
32. Hodges, Carl N. Greenhouses for desert horticulture. — Building Research, January/March, 1972.
33. Руководство по строительной климатологии (пособие по проектированию). М., Стройиздат, 1977.
34. Королев А. Б., Шабалин В. Н., Муравьев В. Б. Пневматические подводные дома и убежища. — В сб.: Некоторые результаты и перспективы применения подводных домов в морских исследованиях. М., Наука, 1973.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В США

У. У. Бэрд (США)

Первым крупным пневматическим сооружением был воздухоопорный обтекатель антенны радиолокатора. Это сооружение диаметром 15,25 и высотой 12,2 м (рис. 1) было возведено для того, чтобы удовлетворить потребности ВВС США в тонком безметальном погодостойком укрытии, предназначенном для защиты крупных антенн новых радарных систем, разрабатывавшихся в США в конце второй мировой войны.

Автор начал работу над этим проектом в 1946 г. в Корнеллской лаборатории аэронавтики — научно-исследовательской организации в Буффало, шт. Нью-Йорк. Чтобы соответствовать эксплуатационным требованиям, выдвинутым ВВС, купол-обтекатель должен был выдерживать ветер со скоростью до 200 км/ч и большую снеговую нагрузку. Никакого поддерживающего каркаса не допускалось, поскольку он создавал бы помехи радиоволнам.

Испытания масштабной надувной модели в аэродинамической трубе показали, что стабильность сооружения можно обеспечить путем предварительного напряжения прочной оболочки сферической формы посредством поддержания сравнительно небольшого давления внутри сооружения. Поскольку результаты наших испытаний выглядели обнадеживающими, с лабораторией был заключен контракт на строительство прототипа. Полноразмерный обтекатель-прототип был изготовлен и смонтирован в 1948 г. Исключи-

© Walter W. Bird, 1983.

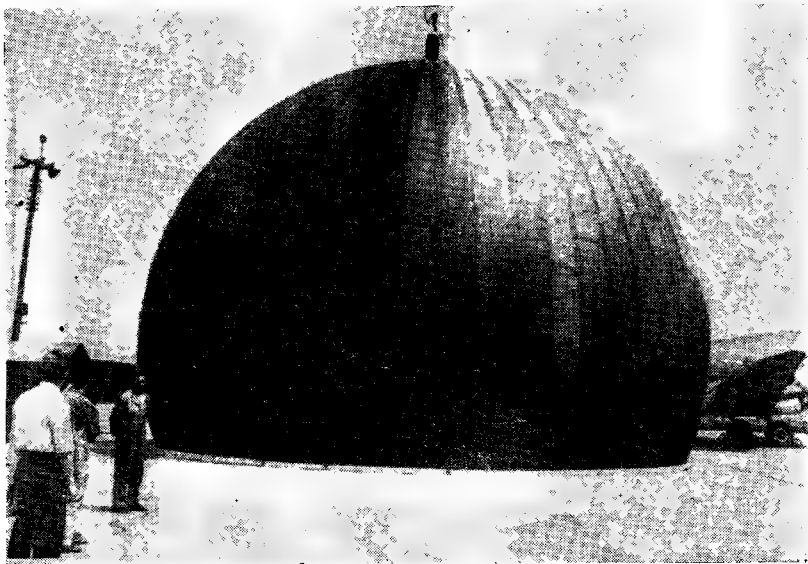


Рис. 1. Первый воздухоопорный обтекатель радиолокационной антенны (фирма «Бэрдэйр», 1948 г.)

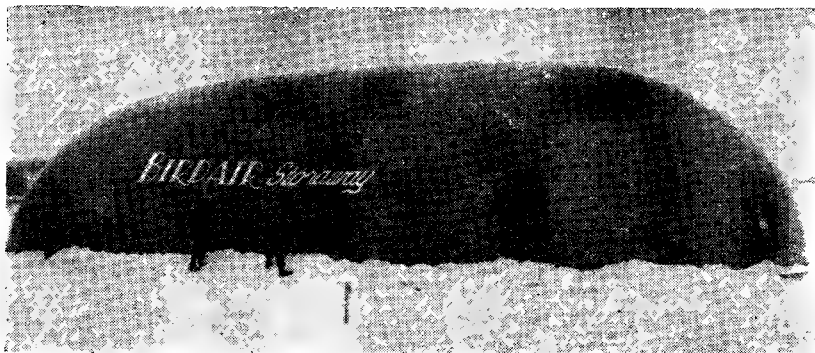


Рис. 2. Первое воздухоопорное укрытие склада (фирма «Бэрдэйр», 1956 г.)

тельно хорошие эксплуатационные качества этого первого воздухоопорного обтекателя привели к немедленному принятию их для использования на радарных установках на севере США и в Канаде, и им приписывается заслуга в возникновении нового вида промышленности.

Около 10 лет работа над пневматическими сооружениями была направлена в первую очередь на получение улучшенных материалов и применение этих сооружений, в том числе куполов-обтекателей различного назначения, надувных параболических антенн, ба-

шен и других в военном деле. Однако, убедившись в том, что пневматические конструкции представляют собой наиболее эффективную конструктивную форму, пригодную для образования больших, свободных от промежуточных опор сооружений, мы с коллегами постарались распространить применение воздухоопорных сооружений и на другие области, такие как строительство товарных складов и баз отдыха. Вначале это не имело успеха и не привлекло внимания архитекторов и инженеров к новому виду конструкций, где применялись инженерные принципы и материалы, не считавшиеся пригодными для строительства зданий.

В 1956 г. автор вместе с четырьмя коллегами создал фирму «Бэрдэйр стракчерз инкорпорейтед» с целью способствовать развитию коммерческого и архитектурного применения пневматических сооружений, продолжая при этом исследования и разработки в военной области. Сначала мы возвели небольшой склад (рис. 2), чтобы показать потенциальные возможности дешевого транспортного укрытия для хранения различных запасов, которое обеспечивает полную защиту от непогоды и вместе с тем может быть легко и быстро возведено непосредственно на грунте, что дает экономии транспортных и эксплуатационных расходов. Вскоре после этого мы представили пневматическую конструкцию, которую предполагалось установить над расположенным под открытым небом плавательным бассейном, чтобы обеспечить его круглогодичное использование.

Подобные сооружения получили широкую известность и привлекли внимание других компаний, работавших с тканями и обычно выпускавших палатки, навесы, тенты и т. д. Однако из-за отсутствия опыта и квалифицированного инженерного персонала многие из сооружений, предложенных этими компаниями, были плохо запроектированы и изготовлены и оказались неудачными в эксплуатации. В то время не существовало стандартов на конструкции данного типа. Чтобы установить хотя бы минимальные стандарты на приемку таких сооружений, некоторые из более солидных компаний объединились с фирмой «Бэрдэйр» и создали ассоциацию «Эйр стракчерз мэнюфэктурерз энд саплайерз ассошйшн» (ASMSA), которая разработала и издала рекомендуемые минимальные стандарты на проектирование и эксплуатационные показатели пневматических сооружений. Эти стандарты использовались в качестве основы для строительных правил в ряде штатов. В связи с небольшими масштабами только зарождающейся промышленности ассоциация была позднее аннулирована, а вместо нее создана организация «Эйр стракчерз институт» как часть ассоциации «Кэнвэс продактс ассошйшн интернэшнел». При покровительстве этой организации рекомендуемые стандарты на эксплуатационные показатели были включены во многие строительные правила. Однако их применение обычно ограничивалось временными сооружениями, так как доступные в то время материалы не могли соответствовать многим требованиям, предъявляемым к постоянным сооружениям.

Поскольку архитекторы и инженеры проявили мало интереса к тканевым сооружениям и не имели опыта или технической квалификации, чтобы их проектировать, большинство решений раннего времени было разработано изготовителями. Однако сотрудники фирмы «Бэрдэйр» были убеждены в том, что тканевые конструкции, в особенности воздухоопорные сооружения, предоставляют огромные возможности в области строительства большепролетных сооружений для отдыха или спорта, и продолжали разрабатывать новые решения. Хотя в то время имелись условия для того, чтобы продемонстрировать возможности наших сооружений применительно к крупным куполам-обтекателям для радиолокационных антенн и объектам коммерческого назначения, мы сознавали, что для одобрения принципа опирания на воздух необходимо заинтересовать архитекторов и инженеров этим новым принципом. Поэтому я часто выступал с докладами на собраниях профессиональных обществ и на симпозиумах.

Благоприятная возможность совместной работы с архитекторами и инженерами возникла в связи с разработкой конструкций для ярмарок и выставок. Здесь архитекторы и экспоненты в равной степени были заинтересованы в создании чего-то нового и необычного, что привлекло бы всеобщее внимание. Они были меньше, чем обычно, связаны ограничительными правилами и требованиями. Кроме того, поскольку предполагалось, что сооружения будут использоваться всего год или два, долговечность материала не имела значения. Передвижных выставок устраивалось довольно много, и транспортабельность и простота возведения сооружений из ткани имели большой успех. Фирма «Бэрдэйр» изготовила 14 сооружений для Всемирной ярмарки в Нью-Йорке в 1965 г. и с тех пор принимала участие почти в каждой большой ярмарке или выставке. Всемирные ярмарки и выставки дали нам возможность продемонстрировать многосторонность тканевых сооружений. Павильон США на выставке ЭКСПО-70 в Осаке, Япония, обеспечил нам первую действительную возможность показать выдающиеся качества воздухоопорного сооружения, усиленного канатами. Это сооружение привлекло огромное внимание во всем мире, продемонстрировав возможности воздухоопорных оболочек перекрывать большие площади без внутренних поддерживающих конструкций. Успех павильона привел к разработке новых материалов и проектных решений, позволивших тканям получить признание как материала, пригодного для изготовления постоянных строительных конструкций, во всем мире.

Ранние разработки. Развитие пневматических конструкций прошло ряд разных, но часто взаимно перекрывающихся стадий. На каждой стадии они получали признание в связи со своими уникальными свойствами, но зачастую по очень разным причинам. Ниже кратко описаны некоторые из сооружений раннего времени, разработанных на каждой стадии.

Сооружения военного назначения. Успех нашего первого воздухоопорного купола-обтекателя для антенны радиолокатора дал воз-

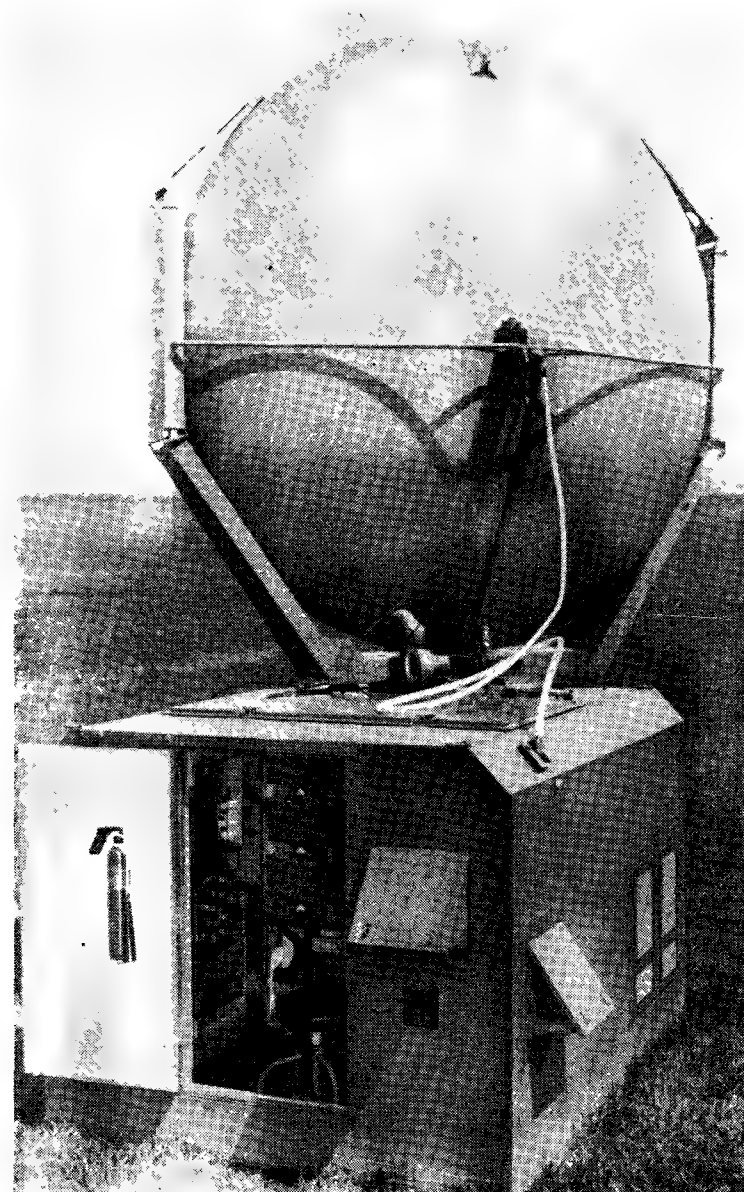


Рис. 3. Надувная параболическая антенна (фирма «Бэрдэйр»)

можность работать в тесном сотрудничестве с военными службами при проектировании мобильных сооружений, отвечающих широкому кругу требований. В дополнение к крупным куполам-обтекателям на неподвижном основании мы разработали ряд более мел-

ких, установленных на грузовики или передвижных куполов для укрытия нового передвижного радарного оборудования. Мы разработали также уникальную надувную параболическую антенну (рис. 3), на которой продемонстрировали возможность соблюдения точных допусков при параболической форме тканевой антенны, которая могла быть спущена и сложена, заняв очень небольшой объем. Другие разработки включали в себя надувные башни, а позднее двухслойные и пневмокаркасные купола-обтекатели.

Далее последовала разработка серии военных сооружений разного назначения. Первый транспортабельный полевой военный склад был переделан из нашего первого коммерческого склада. Чтобы обеспечить полевое хранение крупных машин или самолетов, мы предложили ангар с поддерживающим каркасом — воздухоопорное сооружение с каркасом из легких арок, которые поддерживают оболочку, когда сооружение открыто. Такое решение позволило получить очень легкий мобильный ангар, который в закрытом и поддутом виде мог противостоять сильному ветру и большим снеговым нагрузкам (рис. 4). После разработки идеи двухслойных и пневмокаркасных куполов-обтекателей мы запроектировали ряд ангаров и укрытий пневмопанельной конструкции. Наш метод раскрой и изготовления привел в результате к ячеистой стеновой конструкции, которая обеспечила почти двойную конструктивную эффективность по сравнению со стержневыми пневмокаркасными решениями, предложенными ранее. При таком решении невысокое давление воздуха обеспечивало большое предварительное напряжение в тканевых стеновых элементах, что повышало устойчивость стенок при боковых нагрузках. На рис. 5 и 6 представлены сооружения этого типа.

Опыт проектирования воздухоопорных куполов-обтекателей и разработка более прочных материалов и швов повышенной прочности дали нам возможность создать защитные укрытия для наземных станций космической связи. Четыре крупных купола-обтекателя, диаметр наибольшего из которых составляет 64,6 м, а высота 50,2 м, достаточно крупные для того, чтобы полностью укрыть 16-этажное здание, были установлены в США, Франции, ФРГ и Канаде. Первый купол был смонтирован в США в 1968 г. (рис. 7). Все четыре купола до сих пор находятся в эксплуатации.

Воздухоопорные купола-обтекатели для антенн радиолокаторов, как и другие мягкие оболочки, предназначались для применения в военных целях, так как только они могли обеспечить решение существующих тогда проблем. Военные ведомства не считались с тем, будут ли сооружения отвечать требованиям норм и правил, установленных для обычных сооружений, а интересовались только тем, чтобы они могли выполнять нужную работу. Несмотря на это, наша проектно-строительная практика разработки обтекателей антенн радиолокаторов и других укрытий военного оборудования дала бесценный опыт и возможность продемонстрировать надежность решений и оборудования, равно как и показала исключительные возможности пневматических конструкций как для возду-

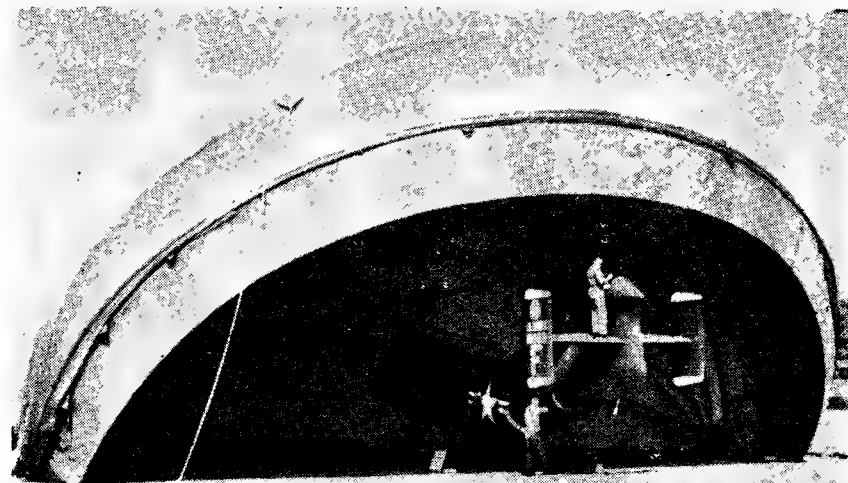


Рис. 4. Воздухоопорный мобильный ангар с поддерживающими рамами (фирма «Бэрдэйр»)

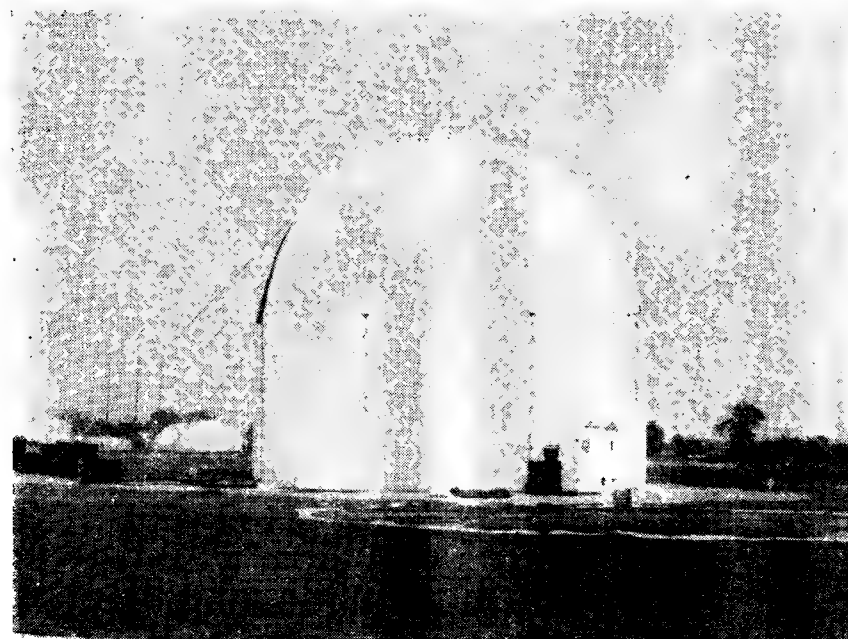


Рис. 5. Пневмопанельный обтекатель радиолокационной антенны (фирма «Бэрдэйр»)

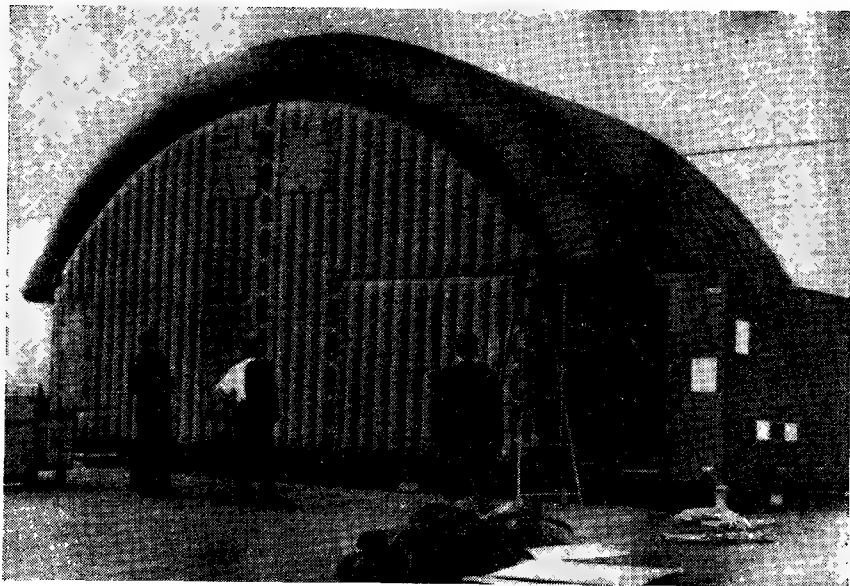


Рис. 6. Пневмопанельное укрытие для оборудования (фирма «Бэрдэйр»)

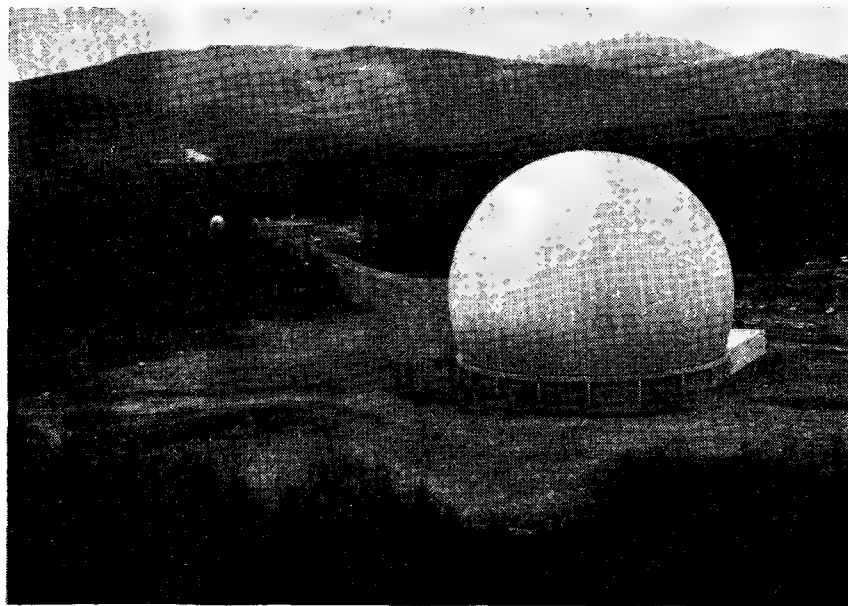


Рис. 7. Укрытие-обтекатель системы «Тельстар» (наземная станция слежения за спутниками) диаметром 64,6 м (фирма «Бэрдэйр»)

хоопорных, так и для пневмопанельных сооружений. Мы не только разработали много новых конструктивных концепций, но и оказались в состоянии в процессе совместной работы с поставщиками предложить новые материалы с исключительными свойствами. К последним относится, например, дакрон с диагональным дублированием слоев, покрытый хайпалоном. Этот материал обладает выдающейся прочностью и высокими эксплуатационными качествами, и его использовали с высоким предварительным напряжением в куполообразных укрытиях для антенн радиолокационных станций.

Сооружения гражданского назначения. Успех военных сооружений раннего времени привел к постепенному применению пневматических конструкций в различных сооружениях гражданского назначения. В основном они использовались вначале для складов, так как позволяли получить складские помещения большой высоты, хорошо защищенные от непогоды и со свободным от промежуточных опор пространством.

Эти сооружения раннего времени обычно были сравнительно малы, примерно 18×30 м. Вход для персонала часто осуществлялся через открывающиеся внутрь двери или шлюзы. Для ввоза внутрь материалов с помощью автопогрузчиков сооружения часто оборудовались специальной сбалансированной дверью, разработанной фирмой «Бэрдэйр» (рис. 8), или навесными дверями, передвигаемыми вручную. Если двери держались открытыми всего лишь короткое время и доступ в сооружение был ограничен периодами со слабым ветром и небольшой снеговой нагрузкой, временная потеря давления не приводила к оседанию сооружения.

Большая вместимость и отличная защищенность от непогоды, обеспечиваемые такими сооружениями, привели также к их применению для хранения сыпучих материалов, которые остаются сухими, что упрощает их обработку (рис. 9). Многие материалы можно легко транспортировать с помощью конвейеров, что снижает потери воздуха. Часто применялись специальные бункерные питатели со сбалансированным давлением. Вначале были проведены эксперименты с «дверями с воздушной завесой», так как они обеспечивали возможность свободного беспрепятственного доступа в сооружение. Однако, поскольку требования к мощности и оборудованию оказались чрезмерными и поскольку эффективно мог быть сохранен только небольшой перепад давления, использование сооружений во время сильного ветра и больших снеговых нагрузок было ограничено. Использование дверей с воздушной завесой в воздухоопорных сооружениях не стало популярным в США.

Хотя первоначально воздухоопорные сооружения рассматривались как временные, их низкая стоимость и многие другие преимущества вскоре привели к признанию их для использования в качестве обычных складов. Единственным крупным недостатком была потеря воздуха при открытых дверях. Для обеспечения беспрепятственного доступа автомашин в помещения складов независимо от погоды наиболее удачными оказались шлюзы с откатными навесными дверями. Поскольку была доказана неэкономичность

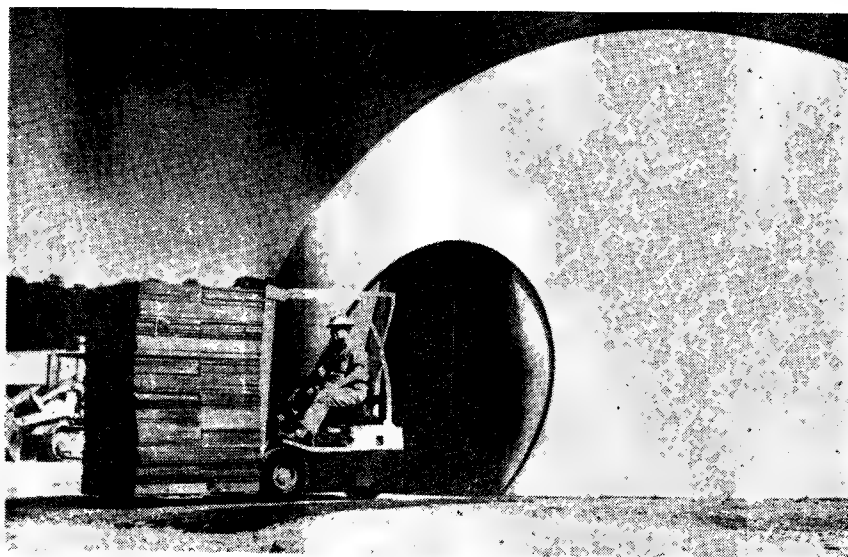


Рис. 8. Воздухоопорный полевой склад, дверь с уравниваем давлением (фирма «Бэрдэйр»)



Рис. 9. Склад сыпучих материалов (фирма «Эйр-Тех»)

устройства обширных шлюзов при небольших сооружениях, в особенности шлюзов, достаточно больших, чтобы пропускать трейлеры, средние размеры складского сооружения возросли до 30—36 м в ширину и 60—90 м и даже более в длину. Увеличение размеров таких сооружений привело также к возрастанию напряжений в ткани, что потребовало применения более прочных и дорогих материалов. Поскольку размер сооружений возрос, их уязвимость к повреждениям также увеличилась.

Чтобы повысить надежность сооружения и вместе с тем допустить использование материалов, которые были разработаны специально для небольших сооружений, фирма «Бэрдэйр» и другие изготовители ввели в практику усиление оболочек канатами. Несколько сооружений раннего времени были усилены за счет кольцевого размещения канатов только в цилиндрической части сооружения, так как напряжения от избыточного давления воздуха на данных участках были выше, чем на сферических торцевых участках. Это, однако, не оказалось удачным для крупных сооружений, так как при сильном ветре высокие напряжения ткани развивались также и в торцевых участках. Для дополнительного усиления была применена установка канатов на сферических концевых участках, однако это привело к недостаточному использованию прямоугольных концевых участков и ограничивало полезную площадь склада. По существу сооружения на прямоугольном плане оказались гораздо более практичными, но такое решение плана привело к неравномерным продольным напряжениям оболочки, в результате чего ее было нелегко усилить канатами.

Чтобы решить эту проблему и создавать более крупные склады и рекреационные сооружения, фирма «Бэрдэйр» разработала уникальную запатентованную тросовую систему для торцевых частей сооружений, которая работала как перераспределитель нагрузки оболочки в концевых участках. Благодаря тщательному размещению тросов и использованию специального раскроя ткани в торцевых участках было достигнуто равномерное продольное напряжение в оболочке сооружения. Это позволило использовать одноосную тросовую систему, более простую в обращении и все же позволяющую иметь низкие напряжения в ткани. Заклучив канаты в рукава и используя специальную конструкцию шва, не допускающую распространения раздира, мы могли свести к минимуму возможность любого повреждения ткани, снижая тем самым в значительной степени уязвимость сооружения. Другим преимуществом такого решения в противоположность обычным сооружениям на прямоугольном плане является то, что оно обеспечивает более высокое расположение покрытия в углах, увеличивая тем самым полезную площадь помещений. В торцах еще более крупных сооружений была применена видоизмененная система канатов, показанная на рис. 10 (строительный тепляк).

Большинство ранних гражданских сооружений были однослойными. Однако вскоре, по мере роста потребности в более эффективном использовании энергии, появилась необходимость в улуч-

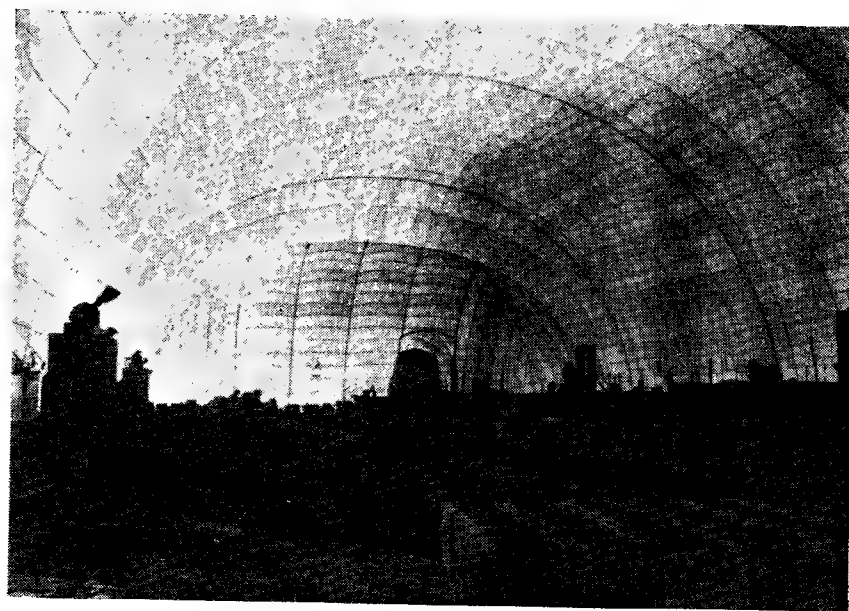
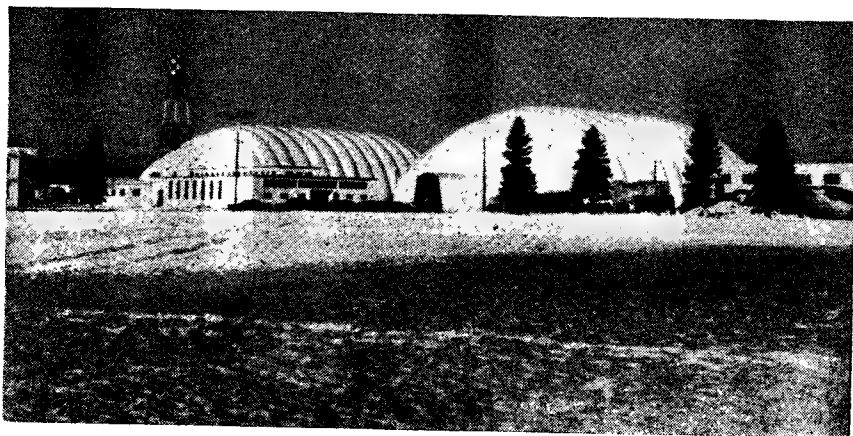


Рис. 10. Воздухоопорный строительный тепляк (фирма «Бэрдэйр»)

шении теплоизоляции там, где требовалось отопление помещения. Пневматическую конструкцию можно утеплить обычным образом, но большой объем теплоизоляции снижает ее транспортабельность, а при укладке слоя теплоизоляции значительно уменьшается светопропускаемость оболочки, что исключает возможность использования дневного освещения. В связи с этим требовалось найти другие решения теплоизоляции.

Общий коэффициент теплопроводности наших двухслойных обтекателей радиолокационных антенн составлял $2,8\text{--}3,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и при использовании внутренней отражающей обшивки мог быть снижен до $1,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Такие же результаты можно было получить на наших сооружениях без потери транспортабельности путем подвески легкой оболочки, образующей замкнутую воздушную прослойку. Поскольку второй слой не является конструктивным, для него можно использовать очень легкие полупрозрачные материалы, обеспечивающие днем хорошее естественное освещение. Еще более высокие изолирующие свойства достигаются использованием в качестве подкладочного материала отражающей фольги, но это приводит к потере светопропускаемости оболочки. Каждый из из-

готовителей в США предлагал различные виды крепления подкладки. Фирма «Бэрдэйр», например, разработала подкладку, которая связана с наружным слоем в швах, а также вдоль линий канатов. В результате образуется множество отдельных подушек, что обеспечивает оболочке привлекательный внешний вид. Способ оказался исключительно эффективным, так как малые размеры подушек ограничивали конвекционные потери воздуха, связанные с его циркуляцией (рис. 11). Подкладка фирмы «Эйр-Тех» была также прикреплена вдоль швов оболочки, но не по тросовой сетке, располагаемой поверх оболочки. По проекту фирмы «Ирвин» материал подкладки прикрепляли вдоль швов с помощью тесьмы, создавая в результате длинные вертикальные воздушные полости. Хотя и предполагалось, что такая конструкция будет иметь более низкие теплоизоляционные показатели в связи с наличием конвекционных потоков воздуха в длинных вертикальных карманах, она легко допускала применение дополнительных прослоек, чтобы обеспечить дополнительные воздушные пространства там, где это требовалось. Использовать громоздкую теплоизоляцию в мобильных пневматических сооружениях непрактично из-за возникающих при этом проблем установки, снятия и хранения большого объема материала. Теплоизолирующие одеяла или пенные материалы в связи с этим были применены только в нескольких постоянных воздухо-

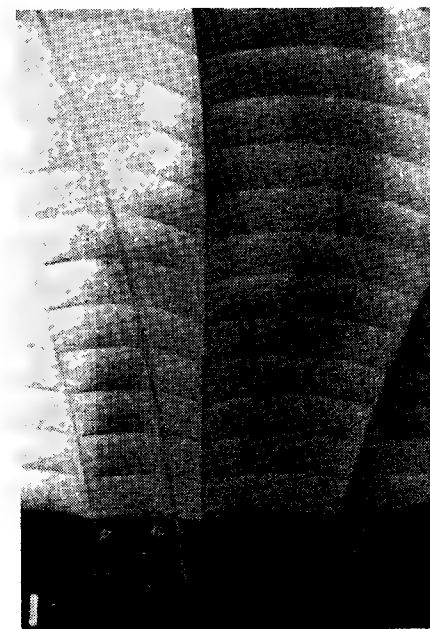


Рис. 11. Теплоизолирующая подшивка (фирма «Бэрдэйр»)

спорных и тентовых сооружений, которые оставались на месте после их прикрепления.

Воздухоопорные сооружения использовались также в качестве теплиц, однако мы не будем здесь их рассматривать, так как обычно используемые при этом поливинилхлоридные и полиэтиленовые пленки имеют сравнительно низкую долговечность. Наиболее распространенным применением принципа воздушного поддува для теплиц было использование двойных полиэтиленовых пленок, уложенных поверх жестких арочных конструкций. Для стабилизации и поддержки пленок производился поддув пространства между двумя слоями. Благодаря воздушной прослойке уменьшался общий коэффициент теплопроводности, а тем самым снижались и теплопотери. При сравнительно частом размещении опор слабое давление воздуха создает небольшие напряжения в оболочке, обеспечивая необходимую устойчивость. Поскольку полиэтилен дешев, такая конструкция обеспечивала получение сравнительно эффективных сооружений с низкой стоимостью. Однако, поскольку пленки не обладают стойкостью против ультрафиолетовой деградаци, их ежегодно заменяют. Для облегчения замены пленок на небольших сооружениях были разработаны удачные решения, но они не подходят для крупных или постоянных сооружений.

Полагают, что если будут разработаны материалы более высокого качества, то возникнут благоприятные возможности для возведения воздухоопорных теплиц. Принцип опирания на воздух позволяет возводить большепролетные оболочки низкой стоимости. Однако при этом требуются более долговечные материалы с высокой светопрозрачностью, а также сложные устройства, обеспечивающие контроль поступающей солнечной энергии и теплопотерь при необходимости экономии энергии. Эти проблемы постоянно изучаются в связи с разработкой нейтральных к солнечному излучению материалов покрытия.

Популярность воздухоопорных сооружений в значительной степени обязана их низкой стоимости, а также тому, что они обеспечивают хорошую защиту от непогоды. Наиболее часто применяемым материалом была ткань из нейлона или полиэфирного волокна, покрытая поливинилхлоридом. Применение акриловых полиуретановых покрытий или пленок «тедлар» дало возможность уменьшить движение пластификаторов к поверхности, помогая тем самым сохранять оболочку чистой и привлекательной и увеличивать срок ее службы. Долговечность мягких оболочек зависит в первую очередь от материалов и методов конструирования, поэтому наибольший срок службы пневматических сооружений при использовании обычных материалов составляет обычно всего 7—10 лет.

Несмотря на проблемы, возникшие из-за неопытности изготовителей и, как следствие, из-за того, что эксплуатационные качества некоторых ранних сооружений были ниже установленных стандартов, ожидается, что воздухоопорные сооружения в США

будут продолжать применять для размещения товарных складов и хранилищ, так как они обеспечивают отличную защиту от непогоды при низкой стоимости. Если они правильно запроектированы и правильно эксплуатируются, то обладают хорошей надежностью. Опыт показал, что проблемы, с которыми пришлось неожиданно столкнуться в ранних сооружениях, были в первую очередь вызваны небрежностью владельцев или плохой эксплуатацией сооружений. Так как оболочка является конструктивным элементом, а не просто покрытием, ее следует держать в хорошем состоянии. Давление воздуха нужно поддерживать постоянно, система воздухоподачи должна быть надежной и способной обеспечить эксплуатацию в случаях неисправности механической или электрической систем. Полная потребность в энергии для поддува и освещения невелика. Пневматические сооружения с правильно запроектированным воздухоподающим оборудованием при хорошей эксплуатации находились в непрерывной работе свыше 15 лет, выдерживая при этом штормовые ветры без повреждений.

Однако резкое повышение стоимости энергии за несколько последних лет значительно ограничило применение воздухоопорных конструкций мобильного типа, где требуются большие расходы тепла. С другой стороны, растущая забота о контроле окружающей среды повысила интерес к применению воздухоопорных сооружений для укрытия резервуаров с чистой водой или водоемов, чтобы предотвратить их загрязнение.

Рекреационные сооружения. После того, как воздухоопорные сооружения в 60-е годы получили всеобщее признание, одним из наиболее быстро развивающихся секторов рынка в США стал сектор спорта и отдыха. Вслед за использованием фирмой «Бэрдэйр» покрытий плавательных бассейнов возник огромный интерес к пневматическим сооружениям, особенно применительно к бассейнам мотелей и клубов (рис. 12). Укрывая свои существующие бассейны, расположенные на открытом воздухе, владельцы были в состоянии обеспечить их круглогодичное функционирование при сравнительно небольших капиталовложениях. При укрытии бассейнов, находящихся под открытым небом, они становились доступными круглый год. Однако использование бассейнов часто было ограниченным, так как имеющиеся материалы оболочек не отвечали строгим требованиям противопожарных правил, предъявляемым к сооружениям.

Одновременно с огромным интересом к теннису в 60-е годы в США возник все возрастающий интерес к круглогодичным теннисным кортам. Воздухоопорные сооружения давали возможность укрыть в зимние месяцы теннисные корты, расположенные на открытом воздухе, чтобы обеспечить их круглогодичное использование при небольших затратах. Возможности большепролетных сооружений с высоким потолком оказались идеальными для теннисных кортов. Полупрозрачный белый материал обеспечивал хорошее естественное освещение. Использование непрямого отраженного света позволяло избежать подвески к конструкциям осветительных

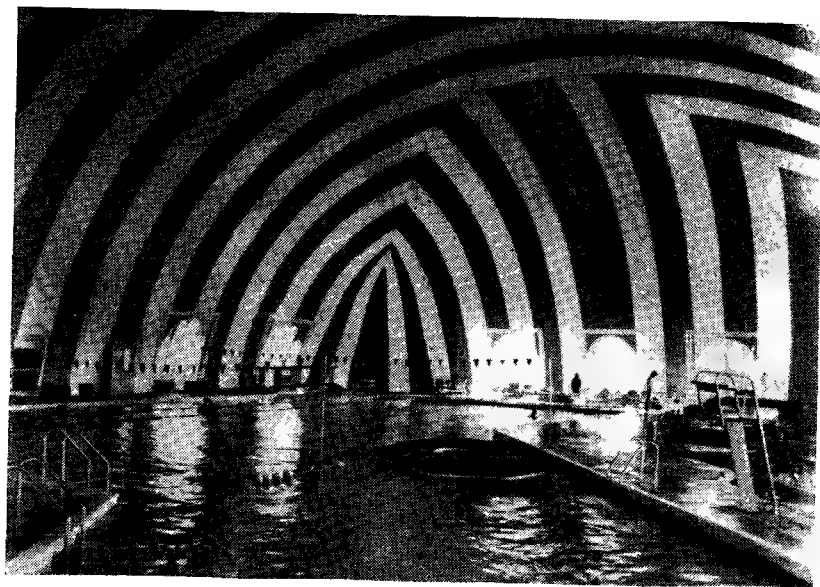


Рис. 12. Укрытие плавательного бассейна при мотеле (фирма «Бэрдэйр»)

средств, что давало преимущество перед обычными осветительными системами.

Спрос на воздухопорные сооружения для теннисных кортов быстро возрастал в 60-е годы и в начале 70-х. Большинство таких покрытий представляли собой однослойные оболочки без какого-либо усиления. Однако, так как потребность в более крупных многокортных сооружениях увеличивалась, началось широкое применение крупных оболочек, усиленных канатами и обладающих большей надежностью при пониженной стоимости. Оболочки фирмы «Бэрдэйр» с усилением имели дополнительное преимущество как покрытия теннисных кортов, так как у них была большая высота потолка в углах здания, что обеспечивало отсутствие каких-либо ограничений при игре в тыльных углах кортов.

Сооружения пролетом 36,5 м, перекрывающие корты по длине, были спроектированы в модуле, равном ширине корта, что позволяло перекрывать четыре, шесть или более кортов одной оболочкой. Такая конструкция может быть легко установлена и снята неквалифицированными рабочими менее чем за один рабочий день (рис. 13). Другие фирмы также предложили некоторые интересные решения. Сооружение фирмы «Эйр-Тех» (рис. 14) и конструкция фирмы «Ирвин» с тросовым усилением (рис. 15) обеспечивали повышенную надежность большим сооружениям. Фирма «Сидэйр» разработала очень интересное школьное рекреационное сооружение. Оно состоит из основной воздухопорной оболочки, усиленной тросами, и из торцов, поддерживаемых рамами (рис. 16). Интересное сопряжение было применено в торцах, имевшее целью обеспечить равномерную передачу усилий и не препятствовать отдельным перемещениям. Аналогичная до некоторой степени конструкция с тканевыми торцевыми стенами, поддерживаемыми деревянными стойками, консольно заглубленными в грунт, была применена в рекреационном центре на западном побережье. Недостаток этого решения заключался в том, что сильное ветровое динамическое воздействие на плоские торцевые стены с воздушными завихрениями по концам крыши вызывало колебания тканевых торцевых стен и кровли. Повышать внутреннее давление в сооружении, чтобы предотвратить это, было непрактично, вследствие чего такая конструкция широко не применялась.

В связи с ростом стоимости энергии в 70-е годы почти все изготовители для снижения теплопотерь стали снабжать свои воздухопорные оболочки теплоизолирующей подшивкой. Хотя такой способ, а также другие усовершенствования позволили снизить теплопотери на одну треть или наполовину, этого оказалось недостаточно для того, чтобы удовлетворить новые требования по расходу энергии для некоторых районов. Поэтому использование воздухопорных конструкций для таких сезонных сооружений, как теннисные корты и плавательные бассейны, стало сокращаться, особенно в районах с низкими зимними температурами или большими снеговыми нагрузками. По-видимому, использование сезонных пневматических сооружений будет ограничено там, где тепло-



Рис. 13. Укрытие теннисного корта, усиленное канатами (фирма «Бэрдэйр»)

потери являются решающим фактором. Потребность же в подобных сооружениях для промышленных и рекреационных целей будет продолжать расти, поскольку они являются наиболее эффективным средством перекрытия больших пролетов. Развиваются новые рынки сбыта, особенно в солнечных районах, где можно использовать преимущества оболочек, связанные с их прозрачностью и другими уникальными свойствами, и где высокие теплопотери не являются решающим фактором.

Пневматическая архитектура. В ранние годы своего развития, когда пневматические сооружения использовались в первую очередь в военных целях или для сезонного применения, немногие архитек-



Рис. 14. Укрытие теннисного корта, усиленное тросовой сеткой (фирма «Эйр-Тех»)



Рис. 15. Воздухоопорное сооружение, усиленное канатами (фирма «Ирвин»)

торы проявляли интерес к воздухоопорным сооружениям, предназначенным для постоянного применения в строительстве. Их обычные формы расценивались скорее как непривлекательные, а возможности перекрытия больших пролетов для организации отдыха еще не были признаны. У нас, однако, была возможность работать с архитекторами при проектировании ряда уникальных сооружений спе-

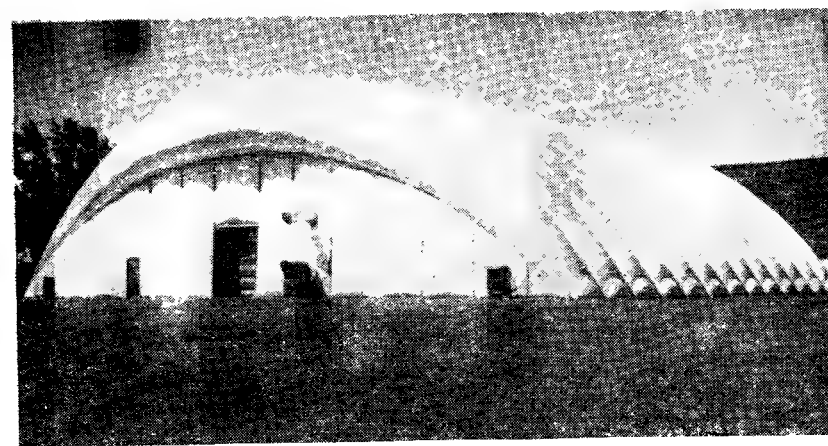


Рис. 16. Школьное рекреационное помещение (фирма «Сидэйр»)

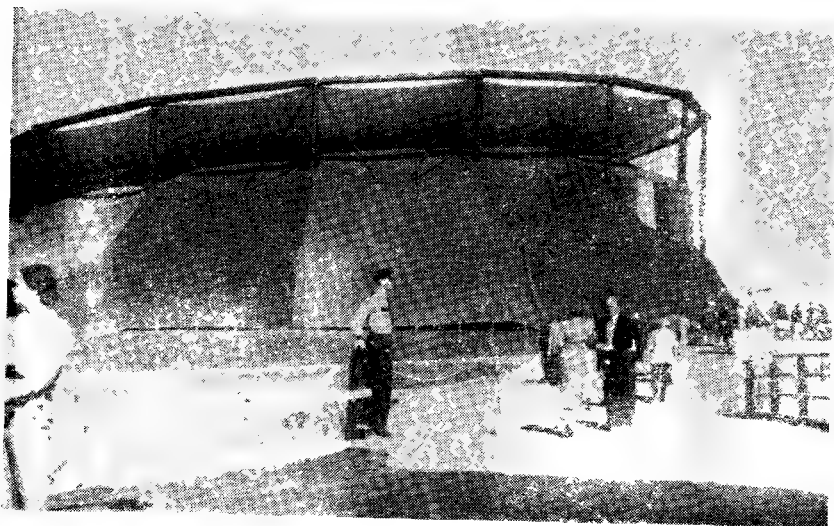


Рис. 17. Покрытие летнего театра в Бостоне в виде пневматической линзы (фирма «Бэрдэйр»)

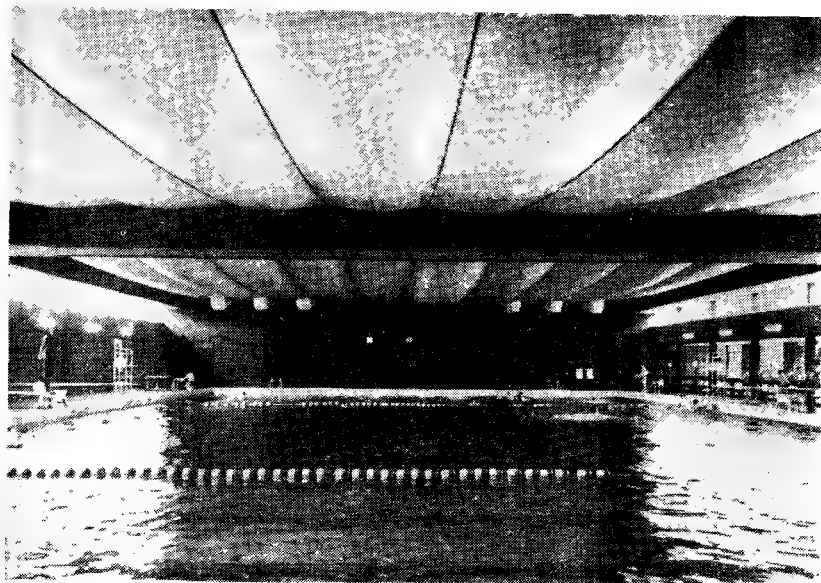


Рис. 18. Покрытие школьного бассейна в Мамаронеке в виде пневматических подушек (фирма «Бэрдэйр»)

специального назначения. В двух наших ранних конструкциях были использованы пневмолинзовые покрытия.

Театр Центра искусств в Бостоне (рис. 17). Этот летний театр был запроектирован в конце 50-х годов в сотрудничестве с фирмами, которые представляли Карл Кох и Пол Уэйдлингер. Здание диаметром 42,6 м имело пневматическое покрытие линзообразной формы, поддерживаемое сжатым кольцом, опирающимся на колонны высотой 12,2 м. У него были отдельные тканевые боковые стены, предназначенные для сезонного применения, которые предполагалось снимать каждую осень. Это сооружение неожиданно подверглось воздействию урагана, который пронесся над Бостоном до того, как стены были сняты. Пневмолинзовое покрытие выдержало сильный ветер без каких бы то ни было повреждений, в то время как тенты боковых стен были сорваны.

Школьный бассейн в Мамаронеке (рис. 18). Школьно-общественный бассейн предполагалось летом использовать в качестве открытого бассейна, зимой же он должен быть укрыт. Чтобы избежать необходимости создания повышенного давления в эксплуатируемом объеме всего бассейна, была запроектирована надувная линзообразная крыша, раскатываемая по канатам, перекинутым через два больших пролета. Межоболочечное пространство было поддуто, чтобы стабилизировать оболочку. Нижняя поверхность оболочек поддерживалась специальными канатами, которые снижали провисание оболочки, а также напряжения в покрытии. Система поддува была спроектирована таким образом, чтобы подавать в полость покрытия теплый воздух. Это предупреждало скопление снега на крыше и обеспечивало обогрев поверхности покрытия над бассейном, существенно повышая тем самым уровень комфорта. Эксплуатационные качества крыши оказались в высшей степени удовлетворительными, а высокая стоимость энергии в то время еще не была решающим фактором.

Главные успехи при работе с архитекторами связаны, однако, с проектированием передвижных зрелищных или выставочных сооружений. Транспортабельность наших тканевых сооружений, простота и быстрота возведения и демонтажа делали их особенно привлекательными. Поскольку такие сооружения предназначались обычно для временного применения, их использование не было жестко ограничено строительными правилами или требованиями.

В соответствии с профилем фирмы «Бэрдэйр» и благодаря ее опыту в разработке как пневматических, так и тентовых конструкций мы имели благоприятную возможность разрабатывать многие выставочные сооружения.

В дополнение к небольшим сооружениям, которые можно было возвести за несколько часов для кратковременного использования с применением винтовых анкеров или балластных мешков, наполненных песком или водой, мы разработали ряд крупных выставочных сооружений. Основными из них являются следующие.

«Пентадом» (пятикупольник). Это выставочное сооружение (рис. 19) площадью 4650 м², построенное для агентства «Эйр бал-

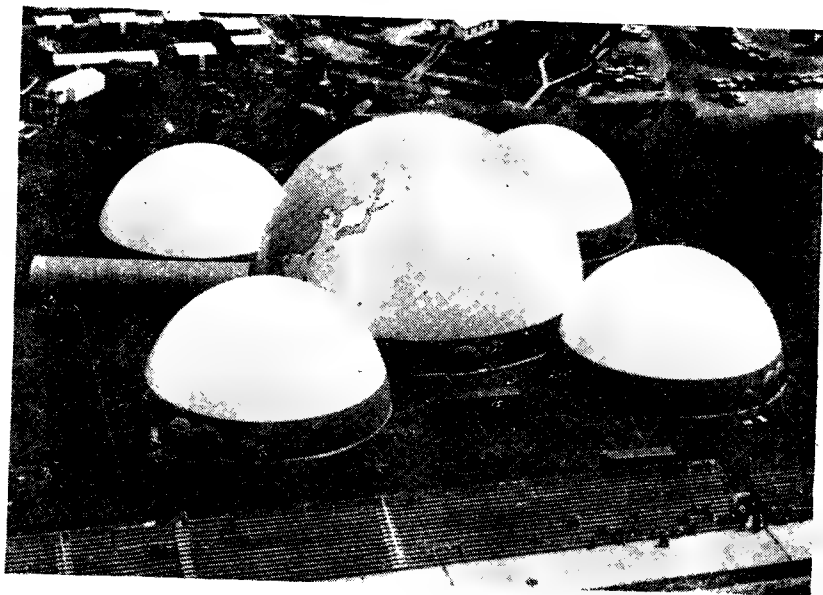


Рис. 19. «Пентадом» — выставочное сооружение на базе ВВС Эндрьюс, США (фирма «Бэрдэйр»)

листике миссائل», с самого начала использовалось как главное здание выставки, посвященной Дню вооруженных сил на базе ВВС Эндрьюс. Сооружение состояло из пяти отдельных воздухоопорных куполов, соединенных между собой большими проемами, окаймленными рамами. Оно было решено в модульной системе и имело достаточно мощное воздухоподающее оборудование, так что каждый из пяти куполов можно было использовать отдельно для устройства малой выставки или укрытия для монтажа. Это сооружение раннего периода впервые продемонстрировало возможность применения воздухоопорных сооружений в качестве очень крупных транспортабельных укрытий.

Выставочное здание «Атомы для мира» (рис. 20) — передвижное здание длиной 91,4 м с переменной шириной до 27,4 м, в состав которого входили выставки, театр, классные комнаты и небольшой атомный реактор. Оно предназначалось для того, чтобы демонстрировать мирное использование атомной энергии во всем мире. Здание, разработанное в содружестве с архитектором Виктором Ланди, было комбинацией пневмопанельных торцевых секций, снабженных шлюзами с вращающимися дверями, с основной частью здания, представляющей собой воздухоопорное сооружение с двойной оболочкой. Чтобы поддерживать и стабилизировать внутреннюю оболочку, требовалась небольшая разность давления. Двойная оболочка обеспечила в результате не только повышенную



Рис. 20. Выставочное сооружение Комиссии по атомной энергии «Атомы для мира» (фирма «Бэрдэйр»)

теплоизоляцию, но и повышенную безопасность, так как опускание всего сооружения в случае повреждения внутренней или внешней оболочки исключалось. Второе, меньшее сооружение было разработано позднее и представляло собой пневматическую подушку с внешней оболочкой, притянутой к земле цепными оттяжками. Внутренняя оболочка, поддерживаемая тросовой сеткой и колоннами, обеспечивала свободный неограниченный проход по всей площади под куполом.

Это сооружение также использовалось для демонстрации мирного использования атомной энергии в малых странах, особенно в Центральной и Южной Америке.

Наибольшую возможность совместной работы с архитекторами предоставляла разработка уникальных павильонов и выставочных зданий для всемирных ярмарок и выставок. Именно на таких зданиях мы имели возможность продемонстрировать универсальность как пневматических, так и тентовых сооружений, и возможности их разностороннего применения, включая обширные выставочные залы без внутренних опор и залы для общественных собраний. Некоторыми из таких сооружений, разработанных и построенных фирмой «Бэрдэйр», являются следующие.

Всемирная ярмарка в Нью-Йорке, 1964 г.

Рестораны «Брасс-Рэйл» — десять сооружений высотой 22,9 и диаметром 15,24 м, состоящих из пучка надутых воздухом и удерживаемых канатами шаров, поднятых на стойке над тентовым навесом, который укрывал закусочные и сувенирные киоски (рис. 21). Каждое сооружение было указательным символом таких ресторанов и привлекало внимание посетителей.

Павильон Шэфера. Два выставочных здания фирмы «Шэфер Бир» имели пневмолинзовые покрытия. Использование этой конструкции дало основную экономию при строительстве за счет снижения нагрузок на фундамент. Узор с применением сусального золота, нарисованный на внутренней оболочке, дал возможность получить весьма привлекательный интерьер.

«Гавайская деревня». Пневматическое здание на выставке штата Гавайи представляло собой эффектное коническое пневмопанельное сооружение (рис. 22). Уникальное тканевое решение было использовано для того, чтобы создать пять «вулканов» на крыше ресторана «Пять вулканов». Отрицательное давление воздуха в решении с двойной оболочкой обеспечивало коническую форму «вулкана» и делало его интерьер открытым.

Перечисленные сооружения, каждое из которых заметно отличается от других, позволили показать многосторонность архитектурных возможностей пневматических сооружений.

Выставка «ЭКСПО-67» в Монреале (Канада).

Павильон провинции Онтарио. На выставке «ЭКСПО-67» не было крупных воздухоопорных сооружений, зато мы имели возможность работать с фирмами «Фэйрфилд» и «Дюбуа», проектируя уникальную тентовую конструкцию. Хотя это сооружение и предназначалось для работы в течение всего двух лет,

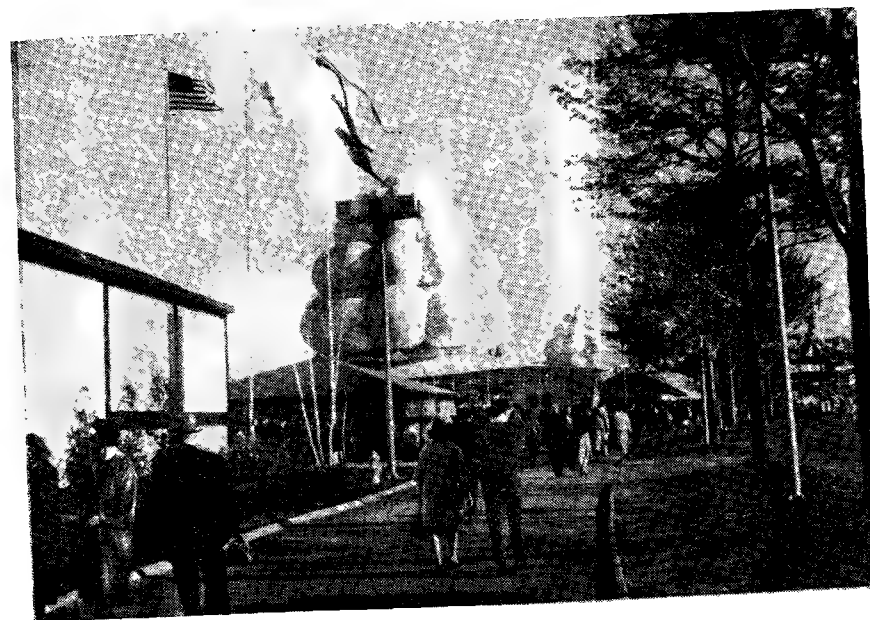


Рис. 21. Рестораны «Брасс-Рэйл» на Всемирной ярмарке в Нью-Йорке (фирма «Бэрдэйр»)



Рис. 22. Надувное двухслойное покрытие павильона «Гавайская деревня» на Всемирной выставке в Нью-Йорке (фирма «Бэрдэйр»)

оно оставалось на месте в качестве примечательного экспоната выставки «Человек и его мир» в течение семи лет. Конструкция была изготовлена из специально разработанного материала, состоящего из стеклоткани, покрытой поливинилхлоридом. Отдельные панели представляли собой предварительно напряженные гиперболические параболоиды различной формы размером приблизительно $15,25 \times 30,5$ м. Требуемый точный раскрой был определен с помощью ЭВМ с учетом необходимой компенсации, вызванной особенностями двухосной силовой характеристики материала. В связи со стабильностью размеров материала не требовалось никакого повторного напряжения ткани, чтобы сохранить ее натяжение во время всего периода службы. Этот материал был позднее намечен фирмой «Бэрдэйр» для использования его для оболочки павильона США на «ЭКСПО-70», а затем послужил основой для новых материалов с тефлоновым покрытием, разработанных для мягких оболочек сооружений стационарного типа.

Выставка «ЭКСПО-70», Осака (Япония).

Павильон США. Это был первый удобный случай продемонстрировать возможности воздухоопорной конструкции, усиленной канатами. Дальнейшее развитие конструкции описано ниже. Выставочное здание Службы путешествий США. Здание представляло собой сферическое воздухоопорное сооружение с картой мира, нанесенной на его поверхность. В нем размещался театр с расположенным по окружности экраном, охватывающим 360° . Оно было запроектировано как передвижной экспонат, и его показывали во многих странах мира, перевоза вместе с экспозицией.

Выставка «ЭКСПО-74», Спокан, шт. Вашингтон (США). Фирма «Бэрдэйр» запроектировала и установила тентовый павильон США на выставке «ЭКСПО-74». Это было очень большое сооружение с напряженной тканью, поддерживаемое тросами. Оно оказалось характерным экспонатом выставки.

Всемирные ярмарки и выставки привлекали внимание не только широкой публики, но и архитекторов и инженеров всего мира. Однако серьезный перелом в признании принципа опирания на воздух применительно к использованию в сооружениях больших пролетов возник в связи с появлением павильона США на выставке ЭКСПО-70 в Японии. Дэвис и Броуди получили одобрение комиссии за предложенный ими проект, основой которого является уникальная пневматическая конструкция с двухслойной оболочкой. Фирма «Бэрдэйр» являлась консультантом архитекторов при разработке этого проекта, и ей было поручено изготовить само сооружение. В связи с тем, что правительство наполовину срезало ассигнования на строительство павильона, возникла необходимость резко снизить стоимость сооружения, сохранив при этом громадный объем выставочного пространства. Фирма «Бэрдэйр» предложила применить воздухоопорное покрытие, усиленное канатами, аналогичное своему проекту «Кэйблдом» (рис. 23).

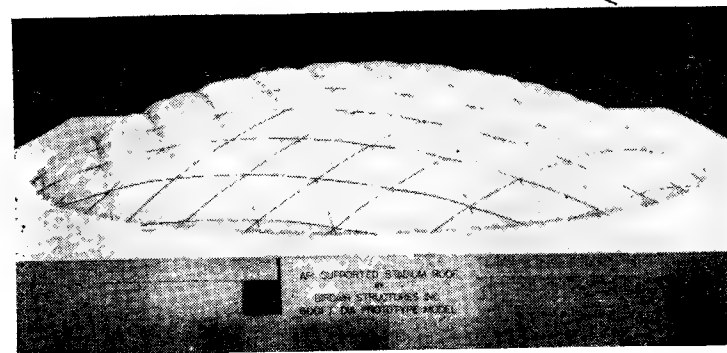


Рис. 23. Модель воздухоопорного покрытия над стадионом диаметром 180 м, усиленного тросовой сеткой (фирма «Бэрдэйр»)

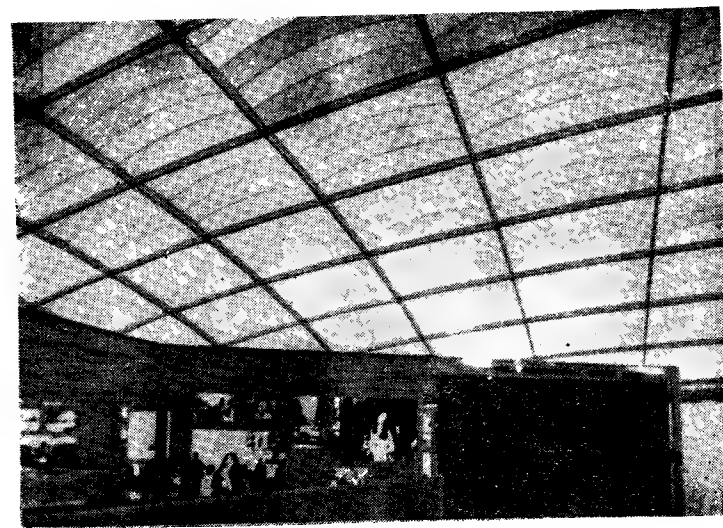


Рис. 24. Павильон США на «ЭКСПО-70». Воздухоопорная оболочка, усиленная канатами (изготовитель — фирма «Тайо Когно», Япония)

В Японии в связи с тайфунными условиями для снижения аэродинамических нагрузок требовалась оболочка низкого профиля. Окончательно было выбрано сооружение с низким силуэтом размером $76,2 \times 137,16$ м (рис. 24)¹. При этом края оболочки опирались на земляные насыпи, которые переходили в покрытие, содействуя тем самым обеспечению более равномерной аэродинамической нагрузки на все покрытие. Фирма «Бэрдэйр» подготовила техниче-

¹ Внешний вид павильона показан на рис. 5 в статье Ю. Мурата, помещенной в данной книге. (Прим. ред.).

кие условия на изготовление этого покрытия, а инженер-конструктор проекта Дэвид Гейгер разработал систему канатов и опорное кольцо. Я рассматриваю павильон США как выдающееся сооружение выставки «ЭКСПО-70». Там было много уникальных зданий, представлявших достижения инженерной мысли, но это сооружение продемонстрировало исключительные возможности воздухоопорной оболочки, усиленной канатами, в качестве решения проблемы экономичного большепролетного покрытия. Эксплуатационные качества сооружения были исключительно высокими. Оно надежно противостояло сильным ветрам.

Успех этого сооружения способствовал появлению огромного интереса к пневматическим сооружениям для применения их в разных целях. Серьезное препятствие представляли требования правил пожарной безопасности для мест возможного скопления людей. Несмотря на то, что многократно было доказано, что воздухоопорные сооружения обладают уникальной огнестойкостью, свойствами автоматического дымоудаления и самозатухания в сочетании с небольшой массой сгораемого материала, эти свойства не были признаны строительной инспекцией. Чтобы такие сооружения получили широкое признание, возникла необходимость в материале, который прошел бы суровые огневые испытания и отвечал также другим требованиям строительных правил, предъявляемым к обычным материалам.

Это привело к предложению об использовании стеклоткани, покрытой тефлоном¹. Фирма «Бэрдэйр» сотрудничала с фирмой «Кэмикэл фэбрикс» и с основными поставщиками — фирмами «Дюпон» и «Оуэнс-корнинг файберглас» — с целью разработать материал, подходящий для использования в большепролетных воздухоопорных и тентовых сооружениях. Первое применение этот материал нашел в тентовом покрытии здания студенческого центра колледжа в Ла Верне (рис. 25), запроектированного совместно с фирмой «Шейвер партнершип» и изготовленного фирмой «Бэрдэйр». Покрытие показало выдающиеся возможности нового материала. Этот материал получил широкое признание для мягких оболочек, строящихся повсюду в США, и принят сейчас к применению во всем мире.

Ниже дано описание нескольких воздухоопорных сооружений нового поколения, возведение которых стало возможным благодаря разработке ширфилла — нового материала из стеклоткани, покрытой тефлоном.

Студенческий центр колледжа и драматическая студия в Ла Верне (Калифорния) площадью 5307 м² (см. рис. 25). Автор проекта — бюро «Шейвер партнершип», Салайна (Канзас). Это первое стационарное тентовое сооружение с оболочкой, которое изготовлено из стеклоткани, покрытой тефлоном. Покрытие представляет собой точно раскроенную оболочку, двухосно напряженную

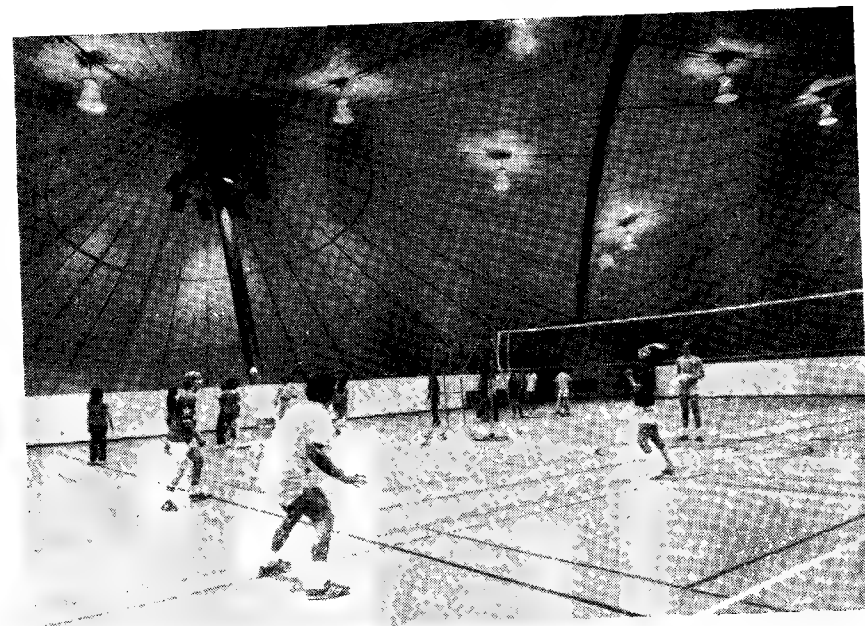


Рис. 25. Студенческий спортивный центр колледжа в Ла Верне и драматическая студия (первая стационарная конструкция из стеклоткани, покрытой тефлоном)

¹ Более подробные сведения об этом материале приведены в другой статье У. У. Бэрда, помещенной в данной книге (Прим. ред.).

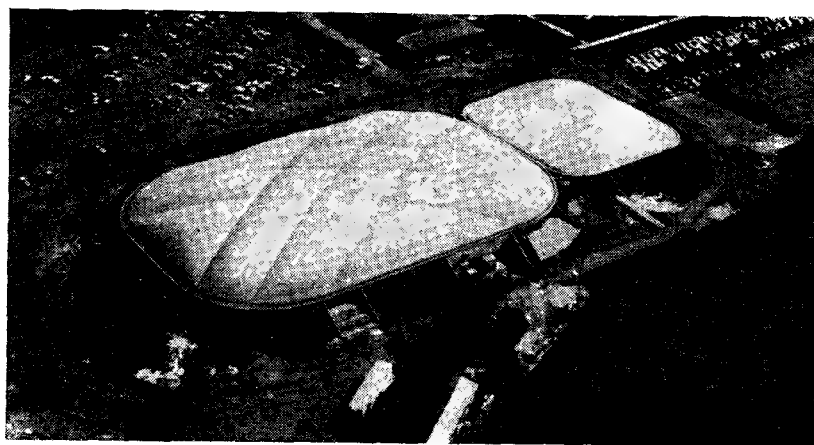


Рис. 26. Воздухоопорные сооружения студенческого центра в Санта-Клара, усиленные канатами

усилиями, создаваемыми предварительным напряжением радиальных тросов. Сооружение находится в эксплуатации приблизительно десять лет и не имеет признаков износа или разрушения. Оно до сих пор такое же белоснежное и привлекательное, как тогда, когда было впервые установлено.

Спортивный зал колледжа площадью 3419 м², Миллиген (Теннесси). Автор проекта — бюро «Шейвер партнершип», Салайна (Канзас). Это первое стационарное воздухоопорное сооружение с оболочкой, изготовленной из стеклоткани с тефлоновым покрытием. Опыт, полученный при разработке данного проекта, привел к существенным улучшениям методов детального проектирования и монтажа, что способствовало признанию нового технического решения.

Спортивный зал колледжа в Санта-Клара площадью 7060 м², Калифорния (рис. 26). Автор проекта — Альберт Гувер, Пало Альто (Калифорния). Воздухоопорная оболочка покрытия основного здания изготовлена из стеклоткани, покрытой тефлоном. Прилегающее справа здание плавательного бассейна перекрыто съемной, усиленной канатами воздухоопорной оболочкой, изготовленной из полиэфирной ткани и покрытой поливинилхлоридом.

Купол-обтекатель на телебашне в виде тора диаметром 42,6 м, Торонто (Канада) (рис. 27). Авторы проекта — Джон Эндрюс, Уэбб, Зерафа и др. (Торонто). Тороидальный обтекатель, укрывающий оборудование микроволновой антенны, поднятой на высоту 410 м, находится под обзорной площадкой и рестораном. Стекло-ткань, покрытая тефлоном, прочна, погодостойка и радиопрозрачна. Лед, снег и пыль не пристаю-т к поверхности, которая остается чистой и сохраняет свои высокие эксплуатационные качества.

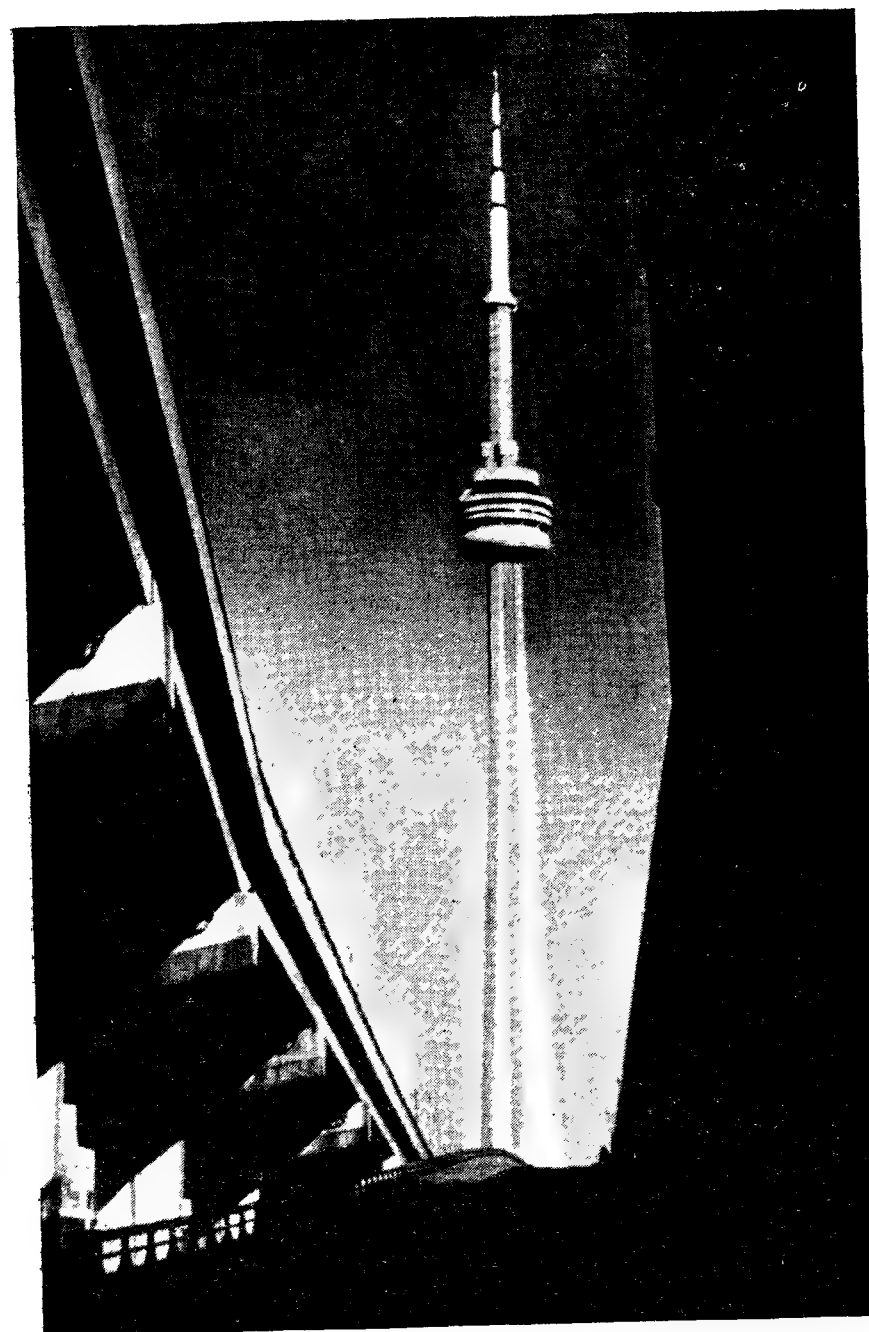


Рис. 27. Тороидальная оболочка микроволновой антенны на телебашне в Торонто

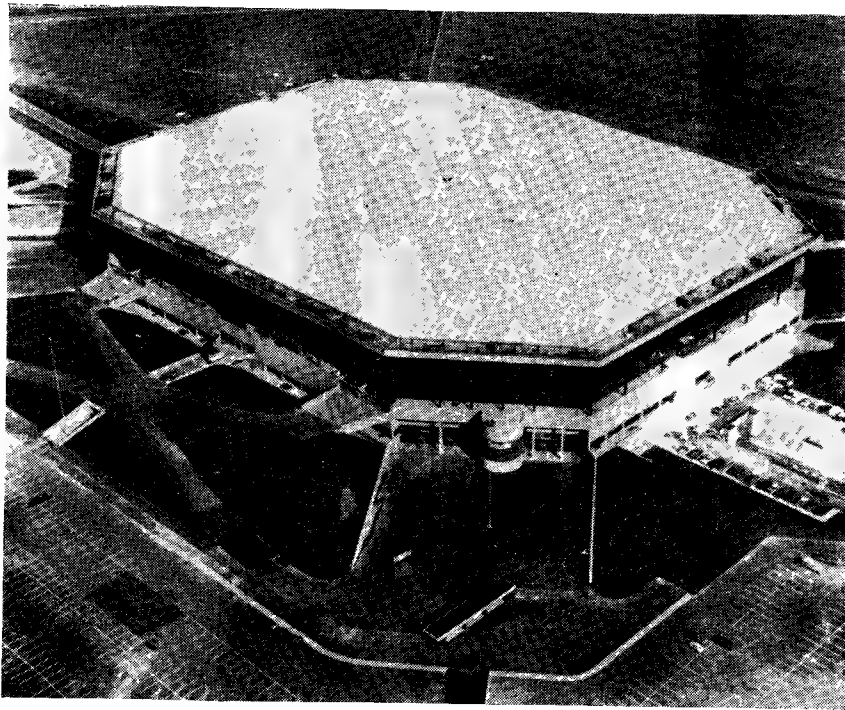


Рис. 28. Воздухоопорное покрытие стадиона «Силвердом» в Понтиаке, Мичиган (фирма «Бэрдэйр»)

Стадион «Силвердом» площадью $37\,160\text{ м}^2$, Понтиак (Мичиган) (рис. 28). Автор проекта — бюро «О'Делл, Хьюлетт и Люкенбах», Бирмингем (Мичиган). Считают, что это самый большой в мире крытый стадион; первый крупный стадион, перекрытый воздухоопорной конструкцией. Оболочка изготовлена из ширфилла (стеклоткань, покрытая тефлоном). Покрытие усилено стальными канатами диаметром $7,62\text{ мм}$, расположенными с шагом приблизительно $12,2\text{ м}$. Форма покрытия и применение акустических звукопоглощающих панелей, подвешенных к канатам, обеспечили в результате акустику помещения, значительно лучшую, чем в крытых стадионах обычной конструкции.

Спортивный зал площадью 6224 м^2 университета Эр-Рияд, Саудовская Аравия (рис. 29). Автор проекта — бюро «Билдинг Сайенсиз», Таусон (Мерилэнд). Первое постоянное воздухоопорное сооружение на Среднем Востоке, изготовленное из материала ширфилл. Покрытие имеет полную акустическую подшивку из фэбрасорба, обеспечивающую отличные термические и акустические качества. В связи с высокой тепловой отражательной способностью материала здание может охлаждаться весьма эффективно. Высокая светопроницаемость материала обеспечивает также хорошее



Рис. 29. Покрытие над спортивным залом университета Эр-Рияд, Саудовская Аравия (фирма «Бэрдэйр»)

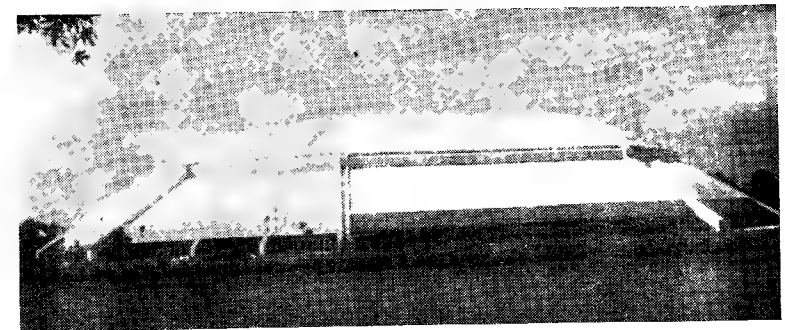


Рис. 30. Университет во Флориде, центр отдыха в Гейнсвилле. Центральное покрытие — воздухоопорная оболочка, боковые помещения — тентовое покрытие (фирмы «Эйр-Тех» и «Ирвин»)

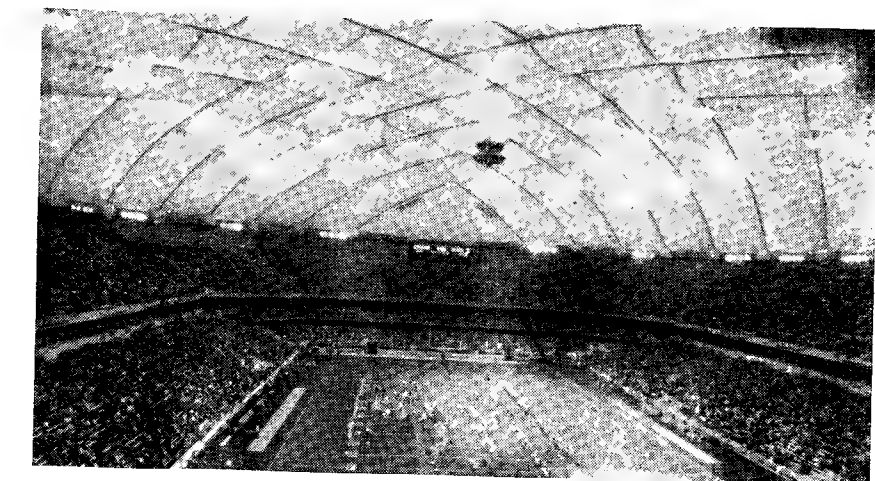
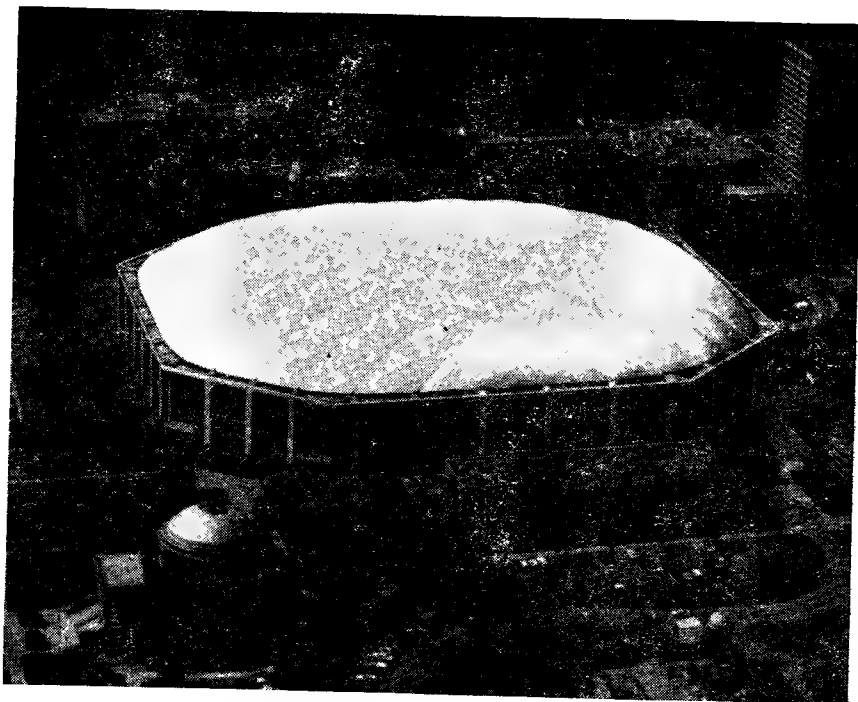


Рис. 31. Сиракьюсский университет, воздухоопорное покрытие спортзала с полной термоакустической подшивкой

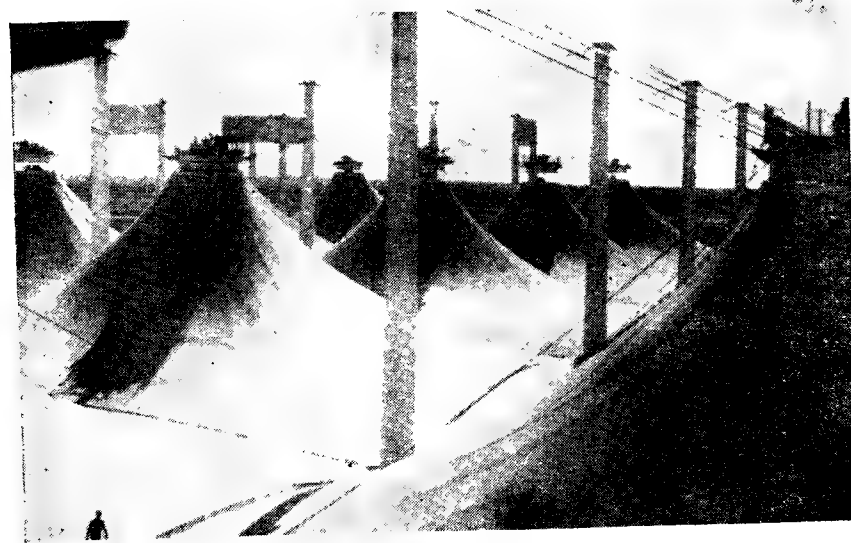


Рис. 32. Аэровокзал и Центр встречи паломников Хадж. Международный аэропорт Джидда, Саудовская Аравия. Общая площадь 425 250 м²

естественное освещение дневным светом. Как выяснилось, материал ширфилл обладает высокими эксплуатационными качествами в жарких солнечных районах, таких как Саудовская Аравия. Успешное применение ширфилла в этом здании привело к тому, что его приняли для покрытия строящегося Центра встречи паломников Хадж площадью 42,5 га.

Стадион и центр отдыха Флоридского университета площадью 9290 м², Гейнсвилл (Флорида) (рис. 30). Авторы проекта — Кодилл, Роуллетт, Скотт, Хьюстон (Техас). Центральная часть покрытия главной арены является воздухоопорной оболочкой, усиленной канатами. Она полностью подшита снизу для повышения теплоизоляционных и акустических свойств. Боковые части покрытия над плавательным бассейном и другими помещениями представляют собой тентовую конструкцию. Оболочки из ткани, покрытой тефлоном, идеально подходят для жаркой погоды солнечной Флориды.

Стадион Сиракьюсского университета площадью 23-225 м², Сиракьюс (шт. Нью-Йорк) (рис. 31). Автор проекта — Финч-Хири, Атланта (Джорджия). Хотя проект и отличается низкой стоимостью, данное сооружение представляет собой один из лучших крытых университетских стадионов в США. Полностью подшитое снизу воздухоопорное покрытие имеет отличные теплоакустические свойства, обеспечивая одновременно эффективное естественное освещение.

Стадион «Метродом» площадью 36 230 м², Миннеаполис (Миннесота). Автор проекта — бюро «Скидмор, Оуингс и Меррилл». В покрытии этого стадиона использована конструкция с диагональными канатами и анкерным кольцом, примененная инженерами Гейгером и Бергером во многих более ранних сооружениях. Внутренняя компоновка стадиона, однако, совсем другая, поскольку он запроектирован так, чтобы обеспечить игру в футбол и бейсбол. Опыт, приобретенный фирмой при проектировании, изготовлении и монтаже прежних оболочек, должен помочь сделать его одним из лучших сооружений в мире, стоимость которого существенно ниже по сравнению с крытыми стадионами обычной конструкции.

Высокая конструктивная эффективность воздухоопорных оболочек делает их идеальными для крупных сооружений больших пролетов. В связи с малой массой материалов тканевых сооружений общая стоимость энергии, необходимой для строительства, обычно гораздо ниже, чем для традиционных конструкций. Высокая теплоотражающая способность материалов из ширфилла делает их пригодными для применения в жарких солнечных районах. Новые материалы и новые решения, разрабатываемые в настоящее время, предоставляют также возможность эффективного применения пассивной системы использования солнечной энергии. Хотелось бы выразить уверенность, что такие разработки приведут к возможности полного обеспечения сооружений энергией, и это будет способствовать признанию воздухоопорных сооружений как стационарных зданий.

Высокая прочность и малая деформативность в сочетании с другими выдающимися свойствами нового материала содействовали использованию и принятию его также в качестве оболочек многих тентовых сооружений, включая выставочные павильоны, такие как здание Флоридского фестиваля в Си-Уорлде, Орlando (Флорида), новое здание для животных в зоопарке Франклина в Бостоне (Массачусетс), магазины Баллока в Сан-Хосе и Сан-Матео (Калифорния). Высокая стабильность размеров этого материала делает его идеальным для изготовления обширных тентовых навесов, таких, например, как те, которые недавно были возведены фирмой «Бэрдэйр» в международном аэропорту Тампа. Они дали возможность создать модульные секции площадью по 0,2 га, используемые сейчас при строительстве Центра встречи паломников Хадж площадью 42,5 га в новом международном аэропорту Джидда в Саудовской Аравии (рис. 32).

Следует ожидать, что тканевые сооружения — и воздухоопорные и тентовые — будут играть все более важную роль в строительстве.

МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ФРГ

Э. Бубнер (ФРГ)

В ФРГ первые сооружения из мягких оболочек, стабилизированных воздухом, были построены в 50-х годах. Они представляли собой временные сооружения, подобные обычным ярмарочным палаткам. В 1962 г. Фрей Отто опубликовал первый том своей книги по пневматическим конструкциям¹, где он проанализировал возможности возведения сооружений из стабилизированных воздухом мягких оболочек (рис. 1), отталкиваясь от таких природных форм, как мыльные пленки [1]. Его идеи были подхвачены многими в 60-е годы и увенчались первым успехом, когда на «ЭКСПО-70» в Осакe были представлены самые разнообразные воздухоопорные и воздухоносные конструкции, что, однако, не повлекло за собой сколько-нибудь заметного расширения сферы применения нового класса строительных конструкций. Томас Герпог [2] заметил по этому поводу, что архитектура, как уже не раз бывало в период после первой промышленной революции, вновь на какое-то время сильно отстала от развития новых технических идей.

После конференции по пневматическим конструкциям в Делфте (Нидерланды) в 1972 г., которая собрала большое число специалистов и продемонстрировала огромный интерес всего мира к пневматическим оболочкам, в германоязычных странах возникла идея обобщить все современные знания в этой области, чтобы поставить, наконец, считавшиеся прежде уникальными воздухоопорные оболочки в ряд «обычных» сооружений. «Ураган века», пронесшийся над Западной Европой в ноябре 1972 г., лишь ненадолго охладил оптимизм энтузиастов: после него число заказов на пневматические оболочки не только не уменьшилось, но даже возросло. Правда, мало кому известно, сколько именно оболочек было заказано для возведения новых объектов, а сколько — для восстановления разрушенных ураганом, и что в действительности число вновь сооружаемых оболочек сокращается. Мало кто также учитывает тот факт, что аварии оболочек были следствием преимущественно нарушений нормального режима эксплуатации (слишком низкого внутреннего давления), неправильного складирования материалов (например, слишком близкого расположения их к оболочке) или отказов резервных вентиляторов при отсутствии надлежащего контроля их работы. Однако, даже если в предстоящие годы воздухоопорные оболочки будут более грамотно проектироваться и эксплуатироваться, их сбыт уже вряд ли достигнет

¹ Русский перевод: Ф. Отто и Р. Тростель. Пневматические строительные конструкции, М., Стройиздат, 1967. (Прим. ред.).

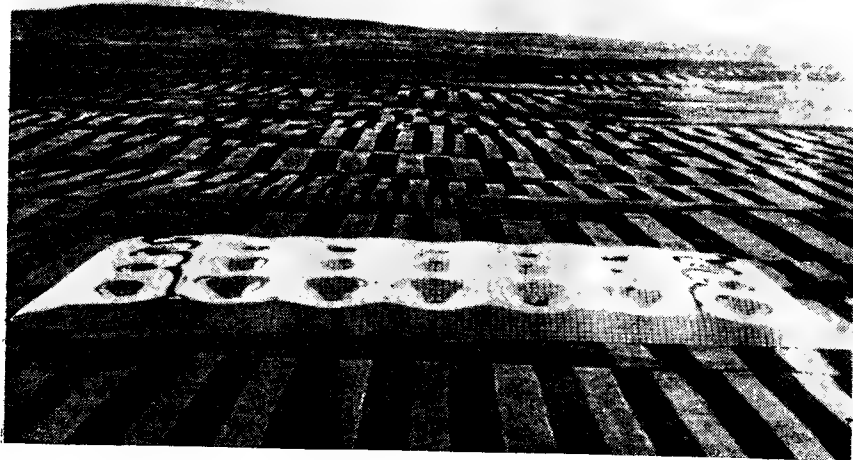


Рис. 1. Макет воздухоопорного покрытия большой площади для теплицы (проект Ф. Отто)

высокого уровня 60-х и начала 70-х годов. Основной причиной такого изменения конъюнктуры, безусловно, является рост стоимости энергии. Речь идет не столько о наиболее ощутимых затратах на воздухообеспечение, сколько о расходах на поддержание определенной средней температуры в помещениях, необходимой, например, для плавательных бассейнов и спортзалов. Актуальность данной проблемы привела уже в конце 70-х годов к появлению многослойных оболочек и к применению для однослойных оболочек специальных теплоизоляционных слоев (подвешиваемых к оболочке или укладываемых на нее сверху), причем не только в воздухоопорных сооружениях, то для них помимо стоимости изготовления существенное значение имеют также ежегодные затраты на эксплуатацию. Поэтому рост стоимости энергии часто влечет за собой изменения в конструктивном решении оболочек.

С другой стороны, в настоящее время на рынках сбыта появляются все более разнообразные материалы для мягких оболочек. При этом происходит как устранение известных недостатков, свойственных покрытиям или самим тканям, и поиск их оптимальных комбинаций, так и существенное расширение областей применения материалов. Многие малогабаритные сооружения, которые раньше изготавливались по отдельным заказам, сейчас стандартизированы и серийно поступают на склады готовой продукции. В связи с этим неизбежно происходят и частичные изменения в структуре фирм-производителей: они либо специализируются на определенном виде изделий, либо становятся многопрофильными. С точки зрения производства воздухоопорные конструкции имеют много общего с

механически напряженными (тентовыми); поэтому трудно оценить современную ситуацию в области пневматических конструкций во всех ее аспектах изолированно от общей проблемы развития мягких оболочек.

Материалы. Кроме воздуха важнейшим элементом пневматических конструкций являются ткани с покрытиями (в дальнейшем иногда называемые общим термином «мембраны»). Следует отметить, что эти материалы не производят специально только для пневматических конструкций, но применяют также в том или ином виде и для тентовых конструкций.

По мере прогресса в области полимерных волокон и покрытий натуральные волокна в тканях во все большей степени заменяются синтетическими. Если в общем объеме производства и потребления все еще преобладают натуральные волокна, то для чисто технических целей они уже почти не используются. В Центральной Европе применяют преимущественно полиэфирные ткани, покрытые поливинилхлоридом (ПВХ). Эти материалы постоянно совершенствуются: повышается как прочность самих тканей, так и прочность их сцепления с покрытием, которая, по последним данным, возросла примерно на 25 % по сравнению с ранее выпускавшимися материалами. При этом устраняется и такой обычный для материалов недостаток, как пониженная прочность при раздире. С покрытием из ПВХ могут применяться и ткани из алифатического полиамида (нейлона), растяжимость которых может быть таким образом уменьшена. Эти материалы, в связи с их невысокой формостабильностью, используются в ограниченном объеме, составляющем менее 10 % объема применения полиэфирных тканей.

Покрытиям из ПВХ, содержащим в своем составе пластифицирующие добавки, присущ ряд недостатков: миграция пластификатора, ведущая к повышению хрупкости материала, возможность поражения грибами, а также загрязняемость. Чтобы исключить эти недостатки, в последнее время для полиэфирных тканей разрабатывают покрытия из хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ). Для нанесения таких покрытий на ткань используют не только обычный способ намазки, но и вновь разработанный метод «валяшмельц» (пропитка расплавом в валках). Данный метод, значительно менее сложный и трудоемкий по сравнению с обычным, применяют и для тканей на основе ароматического полиамида (арамида), например из волокон «кевлар» и «аренка», с покрытием из полиуретана (ПУ). Эти материалы имеют очень высокую механическую прочность и в меньшей степени подвержены старению, чем ткани с покрытием из ПВХ, в связи с отсутствием в составе покрытия пластификаторов. Ткани с полиуретановым покрытием легко сваривать с помощью токов высокой частоты или горячего воздуха.

В США уже в течение нескольких десятилетий широко применяются стеклоткани с покрытием из политетрафторэтилена (ПТФЭ); растет их применение и при строительстве в других странах, в том числе на Ближнем Востоке, а также в ФРГ. Обладая

исключительно высокими эксплуатационными показателями, эти материалы в то же время уязвимы с точки зрения изготовления, транспортировки и монтажа конструкций: при перегибах в недостаточно эластичном из-за жесткого покрытия материале могут появиться трещины. Возможные повреждения покрытия могут привести к разрушению тонких стеклянных волокон (весьма малая толщина которых обеспечивает гибкость ткани) от действия солнечного света и влаги, поскольку стекло не в такой степени устойчиво к атмосферным воздействиям, как это обычно принято считать.

Как показали новейшие исследования, ткани на основе ароматического полиамида также можно выпускать с покрытием из ПТФЭ. Эти материалы имеют высокую механическую прочность, весьма устойчивы к старению и, подобно стеклоткани с покрытием ПТФЭ, являются негорючими, однако в той же степени неудобны в переработке. Кроме того, в покрытие для защиты его от ультрафиолетового излучения необходимо вводить большое количество пигмента, что не позволяет получить материал с достаточной светопрозрачностью.

Из перечисленных материалов лишь немногие используются для воздухоопорных конструкций. Преимущественное применение того или иного материала определяется стоимостью ткани и покрытия, легкостью изготовления и монтажа оболочек (эластичностью материала), требуемой долговечностью, а также возможностью выполнения особых требований, предъявляемых к конструкциям (огнестойкости, светопрозрачности и т. д.). В этом отношении ситуация в разных странах неодинакова. Например, в США для воздухоопорных сооружений очень широко используются стеклоткани с покрытием из ПТФЭ, тогда как в ФРГ их почти не применяют. Здесь самое значительное место (около 90 % общего объема применения) принадлежит полиэфирным тканям с покрытием из ПВХ, что обусловлено относительно невысокой стоимостью материала, простотой работы с ним при изготовлении и монтаже конструкций, а также достаточной в большинстве случаев огнестойкостью (материал оценивается как трудновоспламеняемый класса В1 по стандарту DIN 4102). Применяются также полиамидные ткани с покрытием из ПВХ, а также в небольшом объеме — пленки из ПТФЭ, почти исключительно для многослойных оболочек с регулированием теплового режима. Другие материалы для пневматических сооружений в ФРГ почти совершенно не используют, поскольку к оболочкам, как правило, не предъявляются столь жесткие требования, как, например, негорючесть, слишком большой срок службы (свыше 10 лет) или особо высокая светопрозрачность (более 15 %).

Что касается полимерных пленок, то они в пневматических конструкциях до сих пор не применялись, так как полиэтиленовая и поливинилхлоридная пленки обладают слишком низкой прочностью, а пленка из политетрафторэтилена, более прочная, имеет высокую стоимость. Пленки благодаря своей светопрозрачности

пригодны для укрытия теплиц, но используются они сейчас только для простейших временных сооружений в виде стальных или деревянных арок, обтянутых пленкой. Однако уже более 20 лет назад было предложено применять пленки в культивационных сельскохозяйственных сооружениях в виде оболочек, усиленных лентами или тросами [1].

В последние годы разрабатываются мембранные конструкции из тонких листов стали (в том числе нержавеющей) или алюминия, которые применяют как для покрытий, так и для больших параболических зеркал, предназначенных для использования солнечной энергии в жарких странах [3, 4]. При этом возможны или стабилизация металлических оболочек постоянным внутренним давлением воздуха, как в пленочных или тканевых воздухоопорных и пневмобаллонных конструкциях, или использование сжатого воздуха только для придания листовой мембране требуемой формы. Главной проблемой при применении металлических оболочек является сложность транспортировки крупногабаритных монтажных элементов.

В пневматических оболочках полотнища ткани, имеющие обычно ширину 1,2—1,5 м, соединяются между собой по кромкам шитыми или сварными швами. В шитых швах материал расплавают в 3—4 слоя (накладной с отворотом или запошивочный швы), чтобы обеспечить герметичность и необходимую прочность соединения; однако прочность даже запошивочного шва не превышает 60—70 % прочности ткани. Существенно более высокая прочность соединений, превышающая даже прочность самой ткани, достигается при использовании сварных швов, выполняемых путем нахлестки полотнищ на 6—8 см и их соединения нагревом. В сварном шве передача усилия с одного полотнища ткани на другое осуществляется через материал полимерного покрытия. При этом для обеспечения прочности шва важен равномерный прогрев покрытия, что в наибольшей степени достигается при высокочастотной сварке. Лучшим видом соединения являются комбинированные швы (сварные с последующей прошивкой). Однако из-за проведения двойной операции стоимость выполнения швов повышается, и с развитием техники сварки такие швы стали применять лишь в особых случаях — больше для тентовых, чем для пневматических конструкций.

Чем больше размеры заводских элементов оболочки, выполняемых из отдельных полотнищ ткани, тем экономичнее ее монтаж. Большие оболочки собирают, как правило, из двух или более заводских элементов, соединяемых монтажными швами. Обычно монтажные швы выполняют с помощью люверсов, установленных по краю соединяемых монтажных элементов; по обе стороны люверсов в край полотнища вшивают синтетические шнуры, предохраняющие материал оболочки от появления трещин на сгибах и от преждевременного разрушения.

Анкеровка оболочек к основанию осуществляется в большинстве случаев с помощью оцинкованных труб, закладываемых в отогнутый край оболочки. Трубу прикрепляют к основанию, либо непосредственно к бетонному фундаменту, заглубленному ниже

уровня промерзания грунта, либо к работающим на выдергивание анкерам, при этом шаг креплений определяется прочностью трубы. Несущая способность анкеров определяется главным образом связностью грунта; применяют их в первую очередь для временных сооружений. Герметичность примыкания оболочки к основанию обеспечивается с помощью фартука из полосы ткани достаточной ширины, пришиваемой к оболочке с внутренней стороны и укладываемой на пол.

Ткани с покрытиями имеют относительно высокую светопропускаемость — от 6 до 15 %, поэтому для естественного освещения помещений окна не требуются. Интенсивность естественного освещения может быть увеличена путем устройства в оболочке вставок из прозрачной пленки или с помощью гибкого остекления (из оргстекла и т. п.). Возможно и устройство в сооружениях окон обычного типа, если по функциональным соображениям требуется зрительная связь помещения с окружающим пространством.

Не останавливаясь подробно на разнообразных методах испытаний материалов для пневматических оболочек, укажем только на несколько принципиально важных, но до сих пор не решенных проблем, связанных с характеристиками материалов и методами их определения.

Результаты испытания тканей с покрытиями на одноосное растяжение можно использовать лишь в том случае, если они дополняются результатами опытов при двухосном напряжении, чтобы получить однозначную и воспроизводимую картину напряженно-деформированного состояния ткани на всех стадиях нагружения. Испытания на одно только одноосное растяжение дают результаты, не соответствующие действительному напряженному состоянию материала в конструкции, которое является двухосным.

Для большепролетных мягких оболочек наиболее выгодным является, как правило, такое напряженно-деформированное состояние, при котором ткань с самого начала нагружения имеет одинаковые удлинения вдоль основы и утка. Для этого необходимо, чтобы уже в исходном состоянии ткани нити утка были несколько натянуты, а нити основы — несколько искривлены, т. е. чтобы степень искривления нитей обоих направлений была одинакова; однако в настоящее время возможность создания такой структуры ткани остается еще проблематичной. Наиболее желательно обеспечение равных удлинений ткани в различных направлениях, если на стыках смежных полотнищ меняется расположение нитей основы и утка — например, вблизи полюсных шайб оболочки или при радиальном раскрое сферических зон. С точки зрения проблемы анизотропии удлинений материала при одинаковых напряжениях целесообразно изучить возможность применения в оболочках многоосно ориентированных тканей, чтобы обеспечить однородность напряженно-деформированного состояния оболочки в направлениях главных напряжений. В дальнейшем на этой основе можно было бы приступить к разработке оболочек в форме мини-

мальных поверхностей, равномерно напряженных во всех направлениях.

При изготовлении оболочек следует по возможности отказываться от шитых швов, в которых для обеспечения необходимой прочности и герметичности ткань располагается в 3—4 слоя, образуя жесткие «ребра» на поверхности оболочки. Эти «ребра» имеют значительно меньшую растяжимость, чем сама оболочка, что приводит к преждевременному разрушению ткани вблизи швов. Поэтому швы должны обладать не только той же прочностью, но и той же растяжимостью, что и оболочка; этому требованию более всего соответствуют сварные соединения.

Основные характеристики важнейших типов технических тканей и области их применения в строительстве даны в таблице.

Конструкции. Сооружения, в которых используются пневматические конструкции, разделяются на два основных типа: в одних внутренний объем находится под избыточным давлением воздуха, другие собираются из крупногабаритных ограждающих элементов в виде замкнутых пневматических оболочек¹.

Для больших воздухоопорных оболочек во избежание слишком высоких напряжений, обусловленных большими радиусами кривизны, используется усиление тросами или тросовыми сетками. При этом оболочка между тросами изгибается с относительно небольшим радиусом кривизны, а тросы воспринимают основную часть усилий от внешней нагрузки. Образцом такого конструктивного решения можно считать большепролетные покрытия стадионов в США, разработанные инженерами Гейгером и Бергером. Аналогичные конструкции были запроектированы также и в ФРГ, но осуществлено пока одно только покрытие бассейна «Альпамаре» в Бад-Тельце (рис. 2).

Для стабилизации пневматических оболочек воздухоопорного типа используется избыточное внутреннее давление воздуха, обычно в пределах 300—500 Па. Однако существуют также конструкции, в которых с целью придания оболочке особой формы стабилизация осуществляется за счет пониженного внутреннего давления (вакуума); примерами таких конструкций являются проекционный экран, изготовленный в 1968 г. по проекту Ф. Отто и Б.-Ф. Ромберга (рис. 3), а также ряд объектов, выполненных в 1970—1972 гг. по учебным проектам группы студентов под руководством Г. Минке (рис. 4).

Сложны в конструктивном отношении, хотя и обладают многими эксплуатационными преимуществами, различного рода «трансформируемые» пневматические конструкции (рис. 5). Примеров таких конструкций насчитывается сравнительно немного. Одно из первых осуществленных сооружений — разработанное Ромбергом покрытие плавательного бассейна в Унтерлюсе

¹ В советской технической литературе наиболее употребительно разделение пневматических конструкций соответственно на воздухоопорные и воздуханесомые. (Прим. перев.).

Номенклатура, свойства и применение некоторых технических тканей в Западной Европе (состояние на март 1982 г.)

Материалы: ткань (волокна) покрытия	Начало произ- водства	Достоинства	Недостатки	Переплетение ткани	Способ нанесения покрытия	Объем произ- водства	Область применения
1	2	3	4	5	6	7	8
Полиэфир ПВХ	Середина 60-х гг.	Высокая формостабильность, умеренная стойкость, легкость переработки, трудновоспламеняемость (класс В1 по стандарту DIN 4102)	Подверженность старению, загрязняемость	Полотняное или рогожка	Намазка	Около 5 млн. м ² (1979)	Пневматические (около 20 %) и тенговые конструкции различных форм и назначения
Полиамид ПВХ	Середина 50-х гг.	Высокая растяжимость, умеренная стойкость, легкость переработки, трудновоспламеняемость (класс В1 по стандарту DIN 4102)	Подверженность старению, загрязняемость, низкая водостойкость	То же	»		То же, при повышенных эксплуатационных требованиях
Полиэфир ХСПЭ	Около 1975 г.	Стойкость к старению, химическая стойкость	Более высокие стойкость и жесткость, чем у тканей из полиэфирных и полиамидных волокон с покрытием из ПВХ	»	Намазка «вадцать-шмелы» либо кашнрванне	Незначительный	Гидроизоляция плоских покрытий, внутренняя обделка отстойников и т. п.
Полиэфир, полиамид ПУ	Около 1980 г.	Стойкость к старению, свариваемость, химическая стойкость и водостойкость (некоторые типы)	Недостаточная светопрозрачность, высокая стойкость	Полотняное, рогожка, иногда стигное или саржевое	Намазка или покрытие распылом	Небольшой	Надувные лодки, плотины и т. п.

Арамид ПУ	Около 1980 г.	Стойкость к старению, высокая механическая прочность, высокая свариваемость, химическая стойкость и водостойкость (некоторые типы)	То же	То же	То же	»	Аварийные самолетные трапы, защитные костюмы, надувные лодки
Стекло ПТФЭ	Около 1975 г.	Высокая стойкость к старению, высокая прочность, легкость переработки (класс A2 по стандарту DIN 4102), незагрязняемость	Ломкость, трудность переработки, высокая стоимость, необходимость специальных методов сварки	Полотняное или рогожка	Окувание пыление	Около 10 тыс. м ² (1979)	Пневматические и тенговые конструкции различных форм и назначения, главным образом при повышенных требованиях к огнестойкости
Арамид ПТФЭ	Около 1980 г.	Высокая механическая прочность, высокая стойкость к старению, высокая прочность (класс A2 по стандарту DIN 4102); прочность при разрыве выше, чем у стеклотканей с покрытием из ПТФЭ	Трудность переработки, необходимость введения в покрытие большой массы пигмента (для обеспечения стойкости к ультрафиолетовому облучению)	То же	То же	Небольшой	То же
Полиэфир ПВДФ	Около 1982 г.	Высокая стойкость к старению, легкость переработки (другие свойства пока не изучены)	Сложная технология изготовления, недостаточно хорошая свариваемость	»	Окувание или намазка	Опытные партии	Пока не выявлены

Примечание. ПВХ — поливинилхлорид, ХСПЭ — хлорсульфированный полиэтилен, ПУ — полиуретан, ПТФЭ — политетрафторэтилен, ПВДФ — поливинилиденфторид.

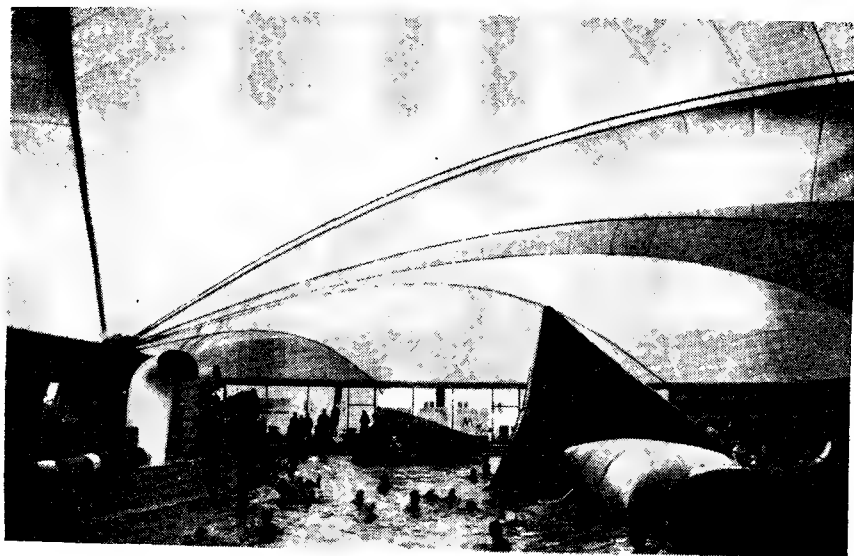


Рис. 2. Покрытие над плавательным бассейном «Альпамаре» в Бад-Тельце (проект Г. Минке, изготовитель — фирма «Л. Штротмайер»)



Рис. 3. Экран широкоформатного кино в виде оболочки, напряженной вакуумом (проект Ф. Отто и Б.-Ф. Ромберга, изготовитель — фирма «Л. Штротмайер»)

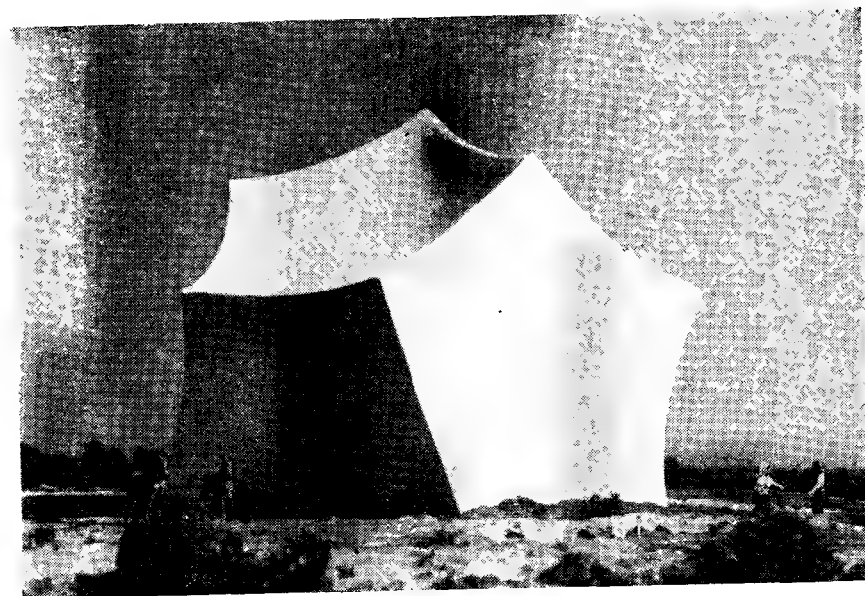


Рис. 4. Макет оболочки здания, напряженной вакуумом (проект Г. Минке)

(1970 г.), представляющее собой сочетание воздухопорной оболочки с тремя стальными арками, используемыми для раздвижки оболочки и поддержания ее в сложенном виде в летнее время (рис. 6). В 1971 г. фирмой «Круп универзальбау» был разработан проект сооружения в виде воздухопорной оболочки в сочетании с пневмоарками, используемыми для поддержания оболочки в случае сброса внутреннего давления при въезде транспортных средств. В пневмолинзовом покрытии плавательного бассейна в Рюльцхайме предусмотрена возможность складывания и сдвижки боковых «линз» в летнее время после стравливания из них воздуха. В 1978 г. фирма КИБ («Конструкция и инженеринг», бывшая «Круп универзальбау») «Круп универзальбау» смонтировала тентовое сооружение с каркасом из стальных труб, в котором оболочка соединена с каркасом посредством надувных сферических элементов, создающих постоянное равномерное натяжение оболочки и обеспечивающих идеальное распределение усилий в конструкции (рис. 7).

В последние годы пневматические конструкции все более широко применяются в гидротехнике в виде плавучих заграждений, плотин и т. д. Наполненные воздухом шланги со стабилизирующими элементами используют в качестве временных ограждений загрязненных участков водоемов, например при разливе нефти (рис. 8); это позволяет предотвратить распространение загрязнения и облегчает работы по очистке водоема, которые выполняются лишь на ограниченной площади. Данный способ, однако, применим лишь для водоемов со слабым течением и при небольшой волне.

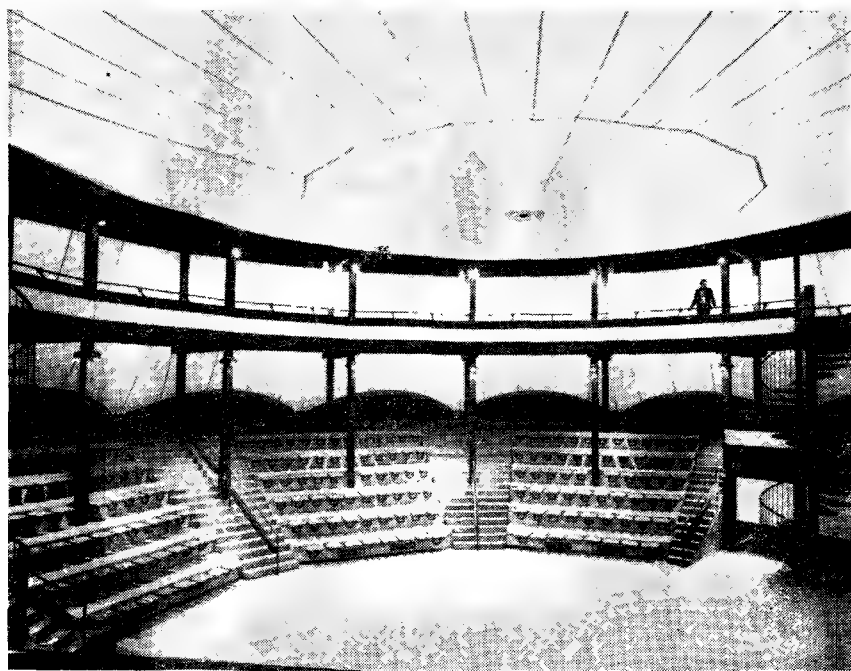
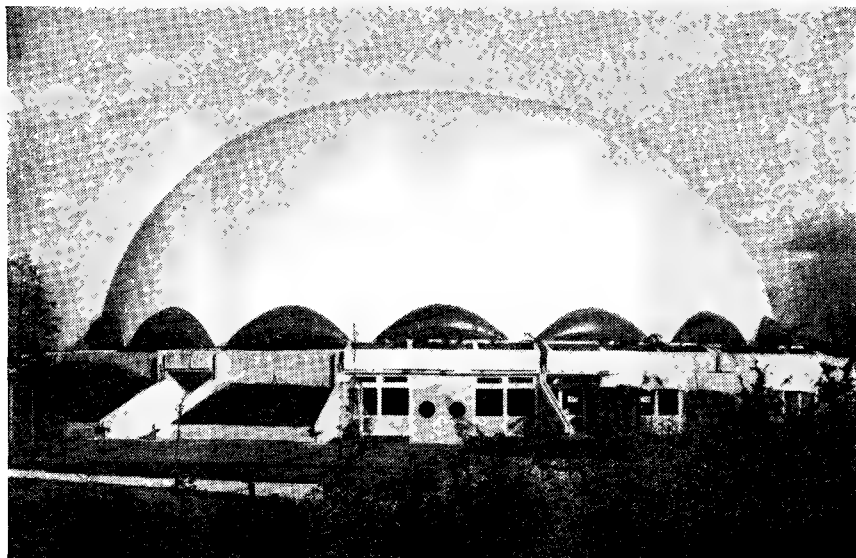
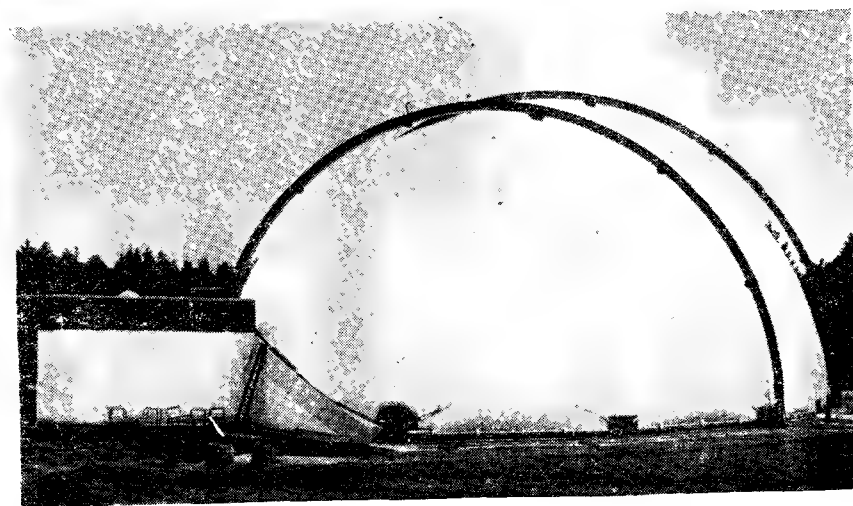
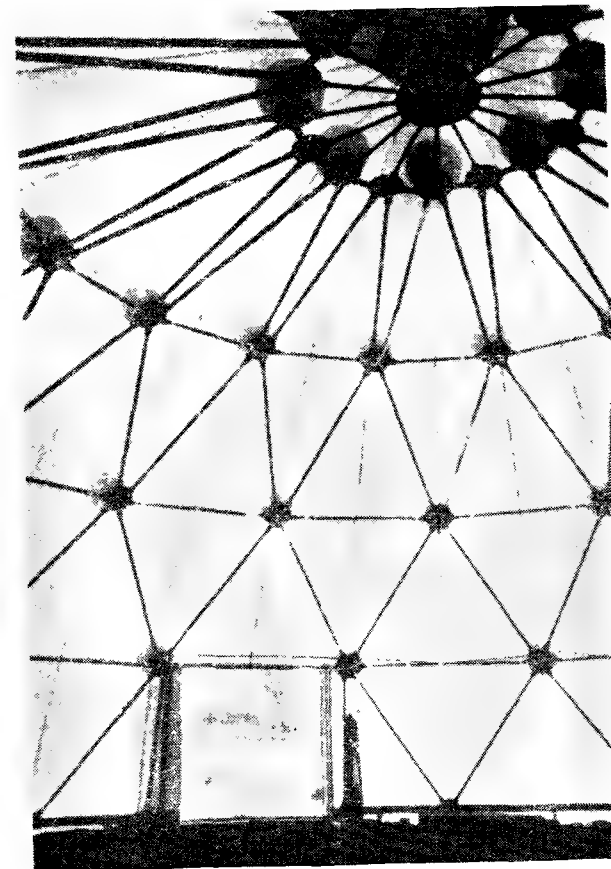


Рис. 5. Клуб с пневмолизовым трансформируемым покрытием в Рюльцхайме (проект Клейне, Куна, Рихрата, Шибера, Витте; изготовитель — фирма «Крупп универзальбау»)



↑
Рис. 6. Раскрывающаяся воздухоопорная оболочка всепогодного плавательного бассейна в Унтерлюсе (проект Б. Ф. Ромберга, изготовитель — фирма «Л. Штронайер»)



→
Рис. 7. Оболочка купола, натягиваемая надувными баллонами, расположенными в узлах сетчатого купола (фирма «Конструкция и ин-женирбау»)



Рис. 8. Плавающее ограждение акватории, загрязненной нефтью (фирма «Ферзайдаг», Крефельд)

Мягкие надувные оболочки (понтон) много лет используются для устройства плавучих платформ, например при строительстве мостов, а также для подъема затонувших судов. Надувные судоподъемные понтоны изготавливают из высокопрочной ткани и оснащают специальными вентилями, позволяющими регулировать внутреннее давление в процессе подъема (рис. 9). Для таких понтонов обычно применяют ткани ярких цветов, чтобы облегчить водолазам ориентацию в загрязненных водоемах.

Весьма многообразным может быть применение пневматических конструкций для устройства различных искусственных сооружений на реках и каналах. Работы в этом направлении только начинаются; ряд предложений разработан, в частности, сотрудниками университета в Штутгарте. Для таких сооружений можно использовать надувные шланги, пневматы, пневмобаллоны, плоские мембраны в сочетании с надувными шлангами, а также различные комбинации мягких оболочек, наполненных воздухом и водой [5, 6]. Подобные конструкции целесообразно применять в первую очередь для временного перекрытия каналов при ремонтных работах, для укрепления берегов, а также в качестве аварийных заграждений при прорыве плотин и дамб. В данной области в равной степени возможно в зависимости от конкретных требований использование как пневматических оболочек, так и



Рис. 9. Судоподъемные надувные мешки (фирма «Ферзайдаг», Крефельд)

мягких оболочек, наполненных водой. Соединения в таких оболочках можно выполнять в общем по тому же типу, что и в обычных пневматических конструкциях, однако в случае наполнения оболочек водой они должны быть рассчитаны на более значительные усилия. В то же время уже сейчас по специальной технологии (разработанной фирмой «Ферзайдаг» в Крефельде) изготавливают бесшовные шланги диаметром до 8 м, сразу с монтажными фланцами, что исключает необходимость их дополнительного оснащения.

В пневматических конструкциях форма и материал связаны между собой самым непосредственным образом. Эта взаимозависимость должна быть в полной мере реализована в раскрое оболочки, который является связующим звеном между формой и материалом. Раскрой должен соответствовать проектной форме оболочки в стадии эксплуатации, когда оболочка напрягается внутренним давлением и соответствующим образом деформируется. Если оказывается, что при заранее заданной форме оболочки не представляется возможным обеспечить оптимальный с точки зрения статики раскрой (например, из-за чрезмерного расхода материала), необходимо специально решать задачу оптимизации формы. На практике, однако, очень часто применяют весьма невыгодный в конструктивном отношении раскрой оболочек, причем даже не для экономии материала, а лишь ради простоты геометрической формы. Типичным примером являются цилиндрические воздухоопорные оболочки со сферическими торцами, в которых полотнища ткани располагаются в поперечном направлении в цилиндрической части оболочки и в радиальном направлении — в торцах. Такой раскрой, как и различия в геометрии цилиндра и сферы, создает «скачки» напряжений в переходных зонах оболочки. Конструктивно правильной является схема раскроя, когда цилиндрическая часть оболочки имеет посередине небольшой подъем, а полотнища ткани располагаются в поперечном направлении по всей длине оболочки, включая ее торцы, таким образом, что их наклон постепенно увеличивается и крайние (нижние) торцовые полотнища располагаются параллельно нижнему краю оболочки. Такой метод раскроя, правда, требует увеличенного расхода материала (обрезки ткани, обычно используемые при изготовлении сферических торцов оболочек, здесь попадают в отходы), поэтому фирмы-изготовители избегают его применять.

Специфической проблемой для всех воздухоопорных оболочек является раскрой переходных участков между «дышащей» мягкой оболочкой и жесткими шлюзами, так называемых переходников. Трудность здесь состоит не столько в нахождении длины переходного участка, необходимой для свободного деформирования оболочки, а также соответствующего раскроя полотнищ ткани, сколько в правильном выборе очертания выреза в оболочке для примыкания переходника. Это требует знания напряженного состояния оболочки, которое существенным образом зависит от ее формы, что не учитывается многими изготовителями.

Вообще для правильного раскроя оболочки необходим учет многих факторов, которые здесь не рассматриваются. Главное, чтобы задача раскроя решалась специалистом, одинаково хорошо знающим как свойства материала, так и поведение конструкции при различных воздействиях, а схема раскроя была оптимальной в конструктивном отношении и не приводила к большим потерям материала.

До самого последнего времени воздухоопорные сооружения проектировались с таким расчетом, чтобы только обеспечить защиту помещений от дождя, ветра и снега, в связи с чем в них применялись лишь однослойные оболочки. В случаях, когда требовалось отопление помещений (например, в плавательных бассейнах), оно осуществлялось путем подогрева воздуха, подаваемого под оболочку для поддержания избыточного давления. Постепенное истощение природных энергетических ресурсов привело к поиску способов уменьшения или даже полного исключения подогрева воздуха в вентиляционных системах воздухоопорных сооружений путем соответствующей теплоизоляции оболочек. В зависимости от вида сооружения и принятого способа теплоизоляции реализация его может быть сопряжена с большими или меньшими трудностями, которые по-разному преодолеваются различными фирмами. Основные проблемы, которые при этом возникают, связаны с увеличением расхода и массы материалов при использовании специальной теплоизоляции или многослойных оболочек и увеличением затрат труда на изготовление и монтаж конструкций.

Различные способы теплоизоляции воздухоопорных оболочек можно разделить на три группы: применение многослойных оболочек из 2—5 слоев ткани, разделенных воздушными прослойками одинаковой или разной толщины; подвеска к оболочке с определенным зазором теплоизоляционных матов по принципу «холодной» или «теплой» кровли; нанесение на оболочку слоя эластичного пеноматериала (наклейкой или напылением) по принципу «теплой» кровли [7].

Каждому из перечисленных способов теплоизоляции соответствует определенное термическое сопротивление оболочки, количественно оцениваемое коэффициентом теплопередачи K , Вт/(м²·К). Этот коэффициент достаточно наглядно характеризует теплозащитные свойства многослойных оболочек, причем его значение зависит не только от суммарной толщины воздушных прослоек, но и от их числа. В оболочках со специальными теплоизоляционными слоями требуемое значение коэффициента теплопередачи обеспечивается соответствующим выбором толщины этих слоев. Требования теплоизоляции являются решающими при проектировании оболочек для производственных помещений, в которых температура должна быть не ниже 19 °С, как установлено стандартом DIN 4108 в редакции от августа 1981 г. (части 1, 4 и 5), а также рядом других стандартов.

Примером теплоизолированной оболочки в простом двухслойном исполнении является покрытие плавательного бассейна в Глад-

беке, Северный Рейн-Вестфалия (рис. 10), где воздушная прослойка сообщается с внутренним объемом помещения через отверстия, расположенные на уровне земли (рис. 11, а); несущий слой оболочки располагается снаружи. Двухслойные оболочки изготавливаются также фирмой «Мелер», но в них несущий слой располагается изнутри (рис. 11, б); в наружном слое оболочки ширина полос ткани между швами принята больше, чем во внутреннем (150 вместо 130 см), так что наружный слой образует при поддуве оболочки гофрированную поверхность с высотой гофров 6 см. Преимущество подобного решения состоит в том, что снеговой покров, который на поверхности оболочек с раздельными слоями обычно не тает, здесь прижимает более легкий наружный слой оболочки к внутреннему, и образующиеся «тепловые мостики» вызывают таяние снега; это происходит при снеговой нагрузке, превышающей 300 кН/м^2 .

Можно привести также многочисленные примеры воздухоносных (пневмобаллонных) конструкций, причем их применение далеко не всегда продиктовано соображениями теплоизоляции помещений. Это относится, в частности, к пневмолинзовым покрытиям торгового центра Штеглиц в Западном Берлине (рис. 12) и торговой улицы в Марле (рис. 13). Иначе обстояло дело при разработке фирмой КИБ (Эссен) трансформируемых пневмолинзовых ограждений плавательного бассейна в Рюльцхайме (Баден-Вюртемберг), позволяющих эксплуатировать сооружение в различных условиях благодаря возможности перемещения отдельных секций покрытия и стен (рис. 14). Здесь не только решалась задача повышения теплозащитных свойств ограждения, но и была предпринята попытка использования «бросовой» энергии подогретого воздуха, уходящего в атмосферу при работе вентиляционной системы. Предлагалось также дополнительно теплоизолировать покрытие бассейна, однако это повысило бы стоимость изготовления конструкции, а потому не было осуществлено.

Архитектором Й. Линекером предложен принцип решения проблемы теплотехники воздухоопорных сооружений, основанный на разработке конструкции теплоизоляции оболочки в комплексе со всей системой энергоснабжения сооружения [8]. Этот принцип, использованный до сих пор преимущественно при проектировании плавательных бассейнов (рис. 15), предусматривает рассмотрение сооружения в целом как комплекса из трех функциональных подсистем: собственно оболочки, системы кондиционирования и подогрева воздуха и ванны бассейна. Каждая из них может применяться в конкретном сооружении изолированно или в комбинации с другими; например, для спортзалов и зданий многоцелевого назначения может быть использована оболочка в сочетании с системой кондиционирования и подогрева воздуха. Первое сооружение такого типа было построено в Австралии в 1972—1973 гг., и с начала октября 1973 г. оно находится в эксплуатации¹.

¹ См. статью Й. Линекера в настоящем сборнике (Прим. ред.).

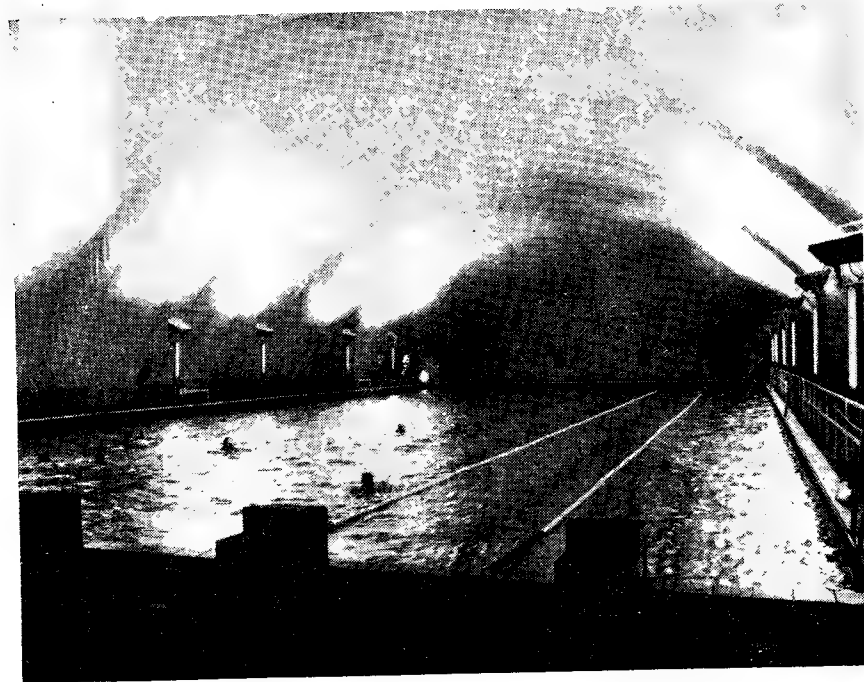


Рис. 10. Двухслойное покрытие над плавательным бассейном в Гладбеке (фирма «Вюльфинг и Хаук», Кауфунген)

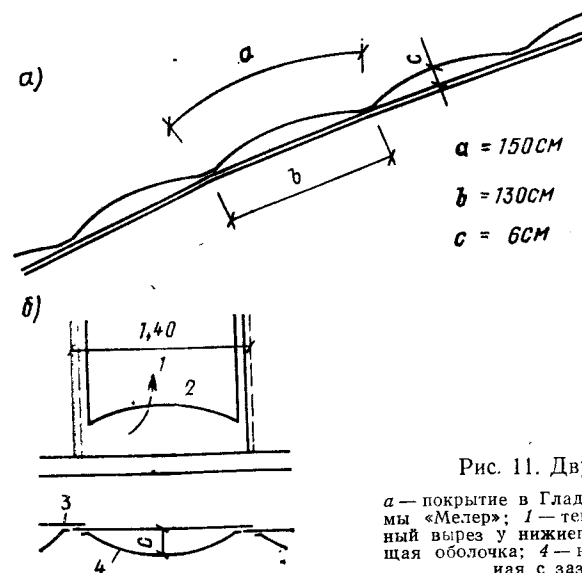


Рис. 11. Двухслойные оболочки

а — покрытие в Гладбеке (см. рис. 10); б — фирма «Мелер»; 1 — теплый воздух; 2 — дугообразный вырез у нижнего края мембраны; 3 — несущая оболочка; 4 — нижняя оболочка, подвешенная с зазором $s=15-20 \text{ см}$

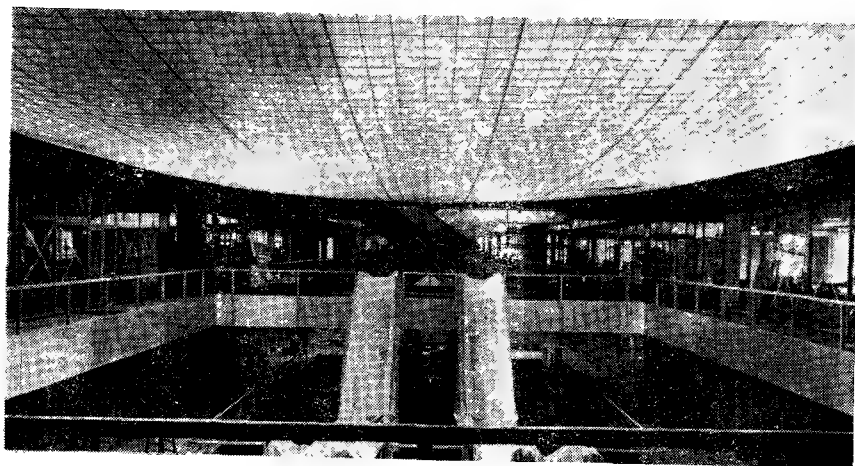


Рис. 12. Пневмолинзовое покрытие светового двора торгового центра Штеглиц (проект Б.-Ф. Ромберга, изготовитель — фирма «Л. Штромайер»)

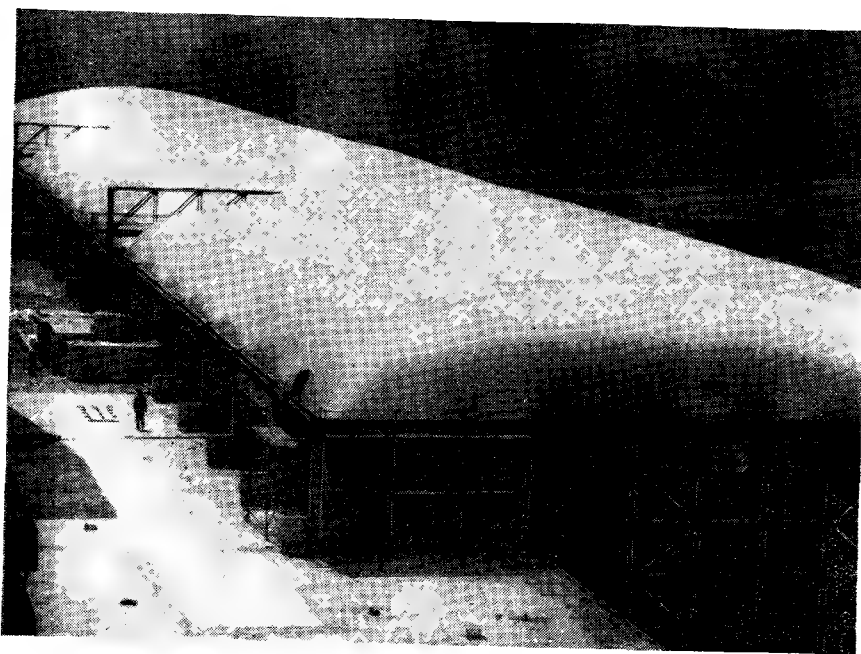


Рис. 13. Пневмолинзовое покрытие над торговой улицей в Марле (проект Клосса, Кольба, Витте, изготовитель — фирма «Крупн универзальбау»)

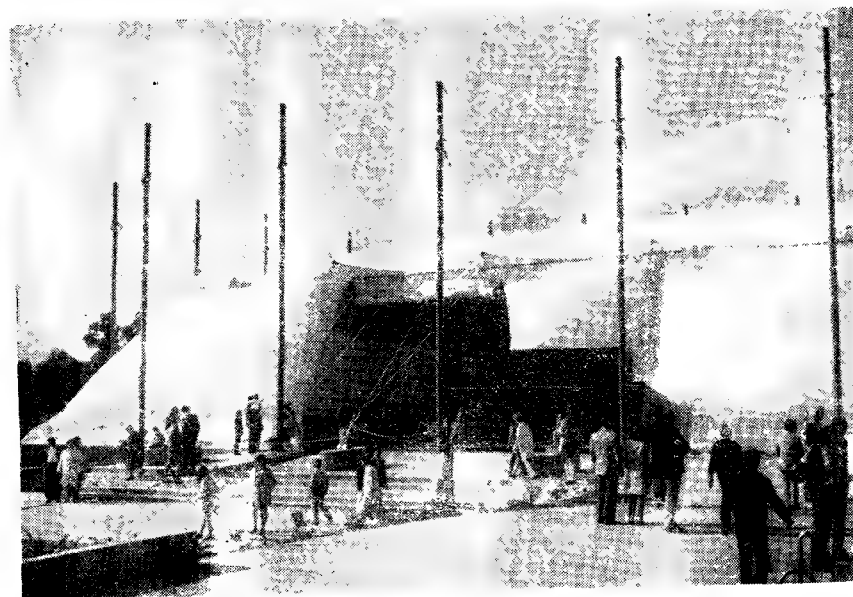


Рис. 14. Трансформируемая пневмолинзовая конструкция кровли и стен плавательного бассейна в Рюльцхайме, проект Клейне и Рихрата, изготовитель — фирма КИБ («Крупн универзальбау»)

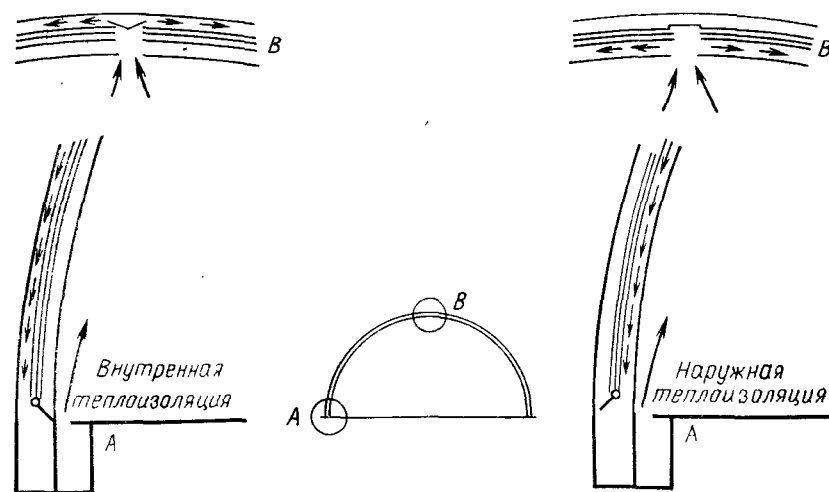


Рис. 15. Схема движения воздуха в оболочках системы И. Линекера

Разработаны также конструкции многослойных воздухоопорных оболочек. Например, в сечении пятислойной оболочки имеется четыре воздушных полости, причем в одной из них воздух циркулирует, а в трех остальных неподвижен. В общем для циркуляции воздуха всегда используется только одна внутренняя или одна наружная полость оболочки: внутренняя — с целью обогрева или, наоборот, охлаждения помещения, наружная — с целью аккумуляции солнечного тепла (рис. 15). Пятислойная конструкция оболочки была всесторонне испытана в климатической камере фирмы «Хехст АГ»; как показывает расчет, оболочка, перекрывающая помещение плавательного бассейна общей площадью 1400 м², получает в год от солнечной радиации в 5—6 раз больше тепла, чем теряет его за счет теплоотдачи, когда в нерабочее время температура в помещении понижается. Первый объект с пятислойной оболочкой покрытия (в Штейне, близ Нюрнберга) введен в эксплуатацию в 1981 г.

Опыт эксплуатации немногих возведенных до сих пор многослойных воздухоопорных оболочек и сравнение их с сооружениями из мягких оболочек, где применены другие способы теплоизоляции, показывает, что для воздухоопорных сооружений наиболее простой способ теплоизоляции заключается в использовании самого воздуха (в многослойной конструкции), поскольку эти сооружения уже оборудованы системой воздушоснабжения. Что же касается утепления оболочек подвешенными к ним в один или несколько слоев матами из теплоизоляционного материала, то этот способ более приемлем для тентовых конструкций.

Несущим элементом пневматических конструкций по существу является сжатый воздух, поэтому данные конструкции нужно выполнять таким образом, чтобы утечка воздуха из оболочки была минимальной и ее можно было бы при необходимости немедленно восполнить. Минимальное избыточное внутреннее давление воздуха определяют статическим расчетом; оно может варьироваться в некоторых пределах, в зависимости от действующих на оболочку нагрузок. Для создания необходимого внутреннего давления в воздухоопорных оболочках используют преимущественно центробежные вентиляторы, а в замкнутых оболочках (пневмобаллонах) — компрессоры. Для обеспечения бесперебойности работы вентиляторов и стабильности конструкции в случае прекращения подачи тока из электросети используют аварийные генераторы, обычно с двигателями внутреннего сгорания.

Все элементы пневматических сооружений (вентиляционные системы, ворота и двери, а также сами оболочки) требуют постоянного наблюдения и контроля за их состоянием и нормальным функционированием, что налагает определенную ответственность на организации, осуществляющие эксплуатацию сооружений. Долговечность пневматических сооружений находится в прямой зависимости от интенсивности работы эксплуатационной службы, содержание которой обходится значительно дороже, чем для традиционных зданий. Именно высокие эксплуатационные затраты

оказываются причиной относительного сокращения объема строительства пневматических сооружений. И если сейчас для легких, быстровозводимых сооружений во все большем объеме применяются технические ткани, то преимущественно в тентовых конструкциях, с легким каркасом из стали или дерева.

Производство и применение. Материалы для мягких оболочек представляют собой, как было сказано выше, сочетание двух компонентов — ткани и полимерного покрытия, причем и ткани, и покрытия могут, в свою очередь, иметь различный химический состав и изготавливаться по различной технологии. Поэтому только в ФРГ и изготавливаться по такой технологии занимается целый ряд фирм. Производство таких материалов занимается целый ряд фирм. Полиэфирные волокна для тканей выпускают фирмы «Хехст АГ» во Франкфурте-на-Майне (волокно «тревира») и «Энка глянцшторфф» в Вуппертале (волокно «диолен»); последняя фирма производит также волокна из полиамида (нейлона РА 6.6) и арамида («аренка»). Волокно из арамида под названием «кевлар» изготавливает также фирма «Дюпон» (США). Тонкое (3 мкм) стекловолокно для тканей поставляется только из США фирмой «Оуэнс корнинг фиберглас» (Толидо, шт. Огайо); стеклянные волокна изготавливают также и в ФРГ, но для технических тканей они не применяются из-за слишком большой толщины.

Основными изготовителями тканей из синтетических волокон и стекловолокон являются фирмы «Ферзайдаг» в Крефельде, «Краммер» в Нинбурге и «Люкенхаус» в Вуппертале; стеклянные ткани изготавливает также фирма «Интерглас» в Ульме.

Несколько фирм выполняют и покрытие тканей, применяя для этого различные процессы — намазку, окунание, «вальц-шмельц». Ткани с покрытием поливинилхлоридом и полиуретаном выпускают фирмы «Ферзайдаг» и «Хаммерштейн» (в Хюкельхове близ Аахена); фирма «Ферзайдаг», кроме того, применяет покрытия на основе хлорсульфированного полиэтилена и фторсодержащих полимеров (PTFE и FEP).

Среди изготовителей конструкций наиболее крупными являются фирмы БФА (Баллонфабрик) в Аугсбурге, КИБ (Конструкционс унд инженирбау) в Эссене, «Койтверке Герберт Кох» в Римстинге (Верхняя Бавария), «Мелер» в Фульде, «Карл Нольте» в Гревене (Вестфалия), «Зауэр» (СКН) в Неттетале близ Венло, «Штронайер и Ко» и «Штронайер инженирбау», обе — в Констанце на Боденском озере, «Вюльфинг и Гаук» в Кауфунгене близ Касселя. Все эти фирмы изготавливают как пневматические, так и тентовые конструкции, причем соотношение тех и других различно у разных изготовителей и зависит от спроса, а также от преимущественной специализации предприятий.

Дать количественную оценку объемов производства конструкций различных типов не представляется возможным, поскольку фирмы-изготовители, как правило, не ведут учета таких данных и не публикуют их. Кроме того, технические ткани применяются, часто в больших объемах, и для других целей, например для гидроизоляции плоских покрытий, для объектов гидротехнического

строительства, а также для изготовления специальных изделий — аварийных самолетных трапов и т. п.

Рассматривая многочисленные примеры применения пневматических сооружений в ФРГ, можно прийти к выводу, что между формой сооружений и их назначением отсутствует сколько-нибудь определенная взаимосвязь. Среди воздухоопорных оболочек явно преобладают два типа — сферические и цилиндрические (с торцами на круговом или прямоугольном плане); лишь пневмобаллонные конструкции отличаются большим разнообразием форм. Причина, по-видимому, заключается в том, что для сооружений достаточно больших размеров формы, основанные на круговом или прямоугольном плане, являются самыми простыми с точки зрения конструкции и раскроя, а потому и наиболее выгодными по стоимости, по сравнению с более функционально обоснованными, но более сложными формами. К тому же такие наиболее массовые объекты, как помещения для собраний, склады, производственные помещения, спортивные площадки, плавательные бассейны, легко «вписываются» в круговой или прямоугольный план. Отсюда ясно, что пневматические конструкции необычных форм появляются, как правило, лишь в тех случаях, когда они используются не просто для перекрытия каких-то помещений, но и для других целей — например, в качестве рекламных экспонатов на выставках. В связи с этим приходится еще раз повторить, что хотя в принципе и существует огромное многообразие возможных форм пневматических конструкций, о чем свидетельствуют многочисленные учебные проекты и публикации [9], их практическое применение ограничивается почти исключительно простейшими геометрическими формами.

Нормы проектирования. Сравняя строительство традиционных зданий со строительством из мягких оболочек во всем их функциональном многообразии, легко убедиться, что материалы для мягких оболочек непрерывно совершенствуются, а богатые возможности их применения еще далеко не исчерпаны. Параллельно с процессом совершенствования оболочек и расширением области их применения происходит и развитие соответствующих норм проектирования; для пневматических конструкций такие нормы разрабатываются уже в течение 20 с лишним лет.

В ФРГ с середины 50-х годов существуют указания по возведению и эксплуатации воздухоопорных сооружений, которые в 1971 г. были уточнены и изданы в ряде федеральных земель [10]. Хотя эти указания были совместно разработаны специалистами из разных мест и имеют идентичные тексты, практически в различных федеральных землях предъявляются разные требования к сооружениям при выдаче разрешений на их эксплуатацию, в силу различных толкований документа. По мере накопления опыта сооружения пневматических конструкций указания в значительной мере устарели, и возникла необходимость их замены общегосударственными нормами строительного надзора для воздухоопорных сооружений. В этих нормах четко определены те материалы для оболочек, качество которых систематически контролируется, а также

способы выполнения их соединений; при использовании таких материалов однослойные воздухоопорные оболочки могут выпускаться без специального разрешения.

Разработка норм специалистами потребовала определенного времени, и они вступили в силу только в марте 1980 г. Появлению этого первого в своем роде документа способствовало большинство фирм-изготовителей мембранных конструкций. Ранее, в 70-е годы, производя в большом количестве воздухоопорные оболочки, они вынуждены были на каждую из них получать разовое разрешение от органов строительного надзора. Теперь такие разовые разрешения требуются только для изготовления оболочек в нетиповом исполнении или с применением новых материалов.

Срок действия указанных норм истек в мае 1982 г. В настоящее время в ФРГ образовано официальное объединение изготовителей воздухоопорных оболочек «Гютегеймашафт мембранбау», которое работает над расширением этих норм путем включения в них предложений по улучшению качества конструкций и дополнительных методов контроля. К этой работе привлечены и фирмы-изготовители других типов мягких оболочек, чтобы можно было распространить нормы не только на пневматические, но и на все мембранные конструкции.

Требования к конструкции и эксплуатации воздухоопорных оболочек содержатся также в новом стандарте DIN 4134, изданном в предварительной редакции в ноябре 1981 г. [11]. Стандарт регламентирует состав необходимой проектной документации и основные положения расчета оболочек, включая расчетные нагрузки; совместно с уже упомянутыми нормами строительного надзора он должен явиться в будущем нормативной основой проектирования пневматических конструкций.

Указанные нормативные документы, как и другие строительные нормы, отражают уровень технического развития в соответствующей области лишь на момент их опубликования. В частности, механические свойства материалов оболочек при различных силовых воздействиях учитываются достаточно приближенно, поскольку в действительности ткани характеризуются нелинейным характером деформирования и сильной анизотропией; рекомендации по расчету распространяются только на оболочки простейших форм. Необходимо поэтому дальнейшая дифференциация содержащихся в нормативных документах требований с учетом будущего опыта оптимизации характеристик материалов и совершенствования методов расчета.

Требования норм соответствуют определенному уровню надежности сооружений и тем самым косвенно определяют возможный срок их службы. Для пневматических конструкций срок службы определяется моментом, когда сооружение полностью приходит в негодность (т. е. становится ненадежным в эксплуатации) вследствие естественного старения или по той же причине возникает необходимость замены отдельных его частей. Срок службы зависит от материала и конструкции оболочки, а также от назначения и

режима эксплуатации сооружения. Фирмы-изготовители пневматических оболочек гарантируют их сохранность обычно в течение 2, максимум 5 лет, и лишь в особых случаях — 10 лет; однако фактический срок службы оболочек всегда существенно больше, поскольку изготовители стараются застраховать себя от необходимости производить гарантийный ремонт конструкций.

Необходимо отметить, что в практике часто используются такие конструктивные решения, методы изготовления и приемы обслуживания пневматических сооружений, которые уже не соответствуют современному уровню знаний. По мнению изготовителей, это объясняется, с одной стороны, повышенными затратами на внедрение различных технических новшеств, а с другой — возможностью компенсации несовершенств сооружения за счет резерва свойств материала¹.

Замечания об энергозатратах для воздухоопорных зданий. Энергетические затраты в сфере строительства не определяются только расходом энергии на эксплуатацию зданий, но включают также «первичные» энергозатраты на добычу и переработку строительных материалов, на транспортировку и возведение конструкций, а также на их разборку по истечении срока службы и ликвидацию образовавшихся отходов. Оценка строительных сооружений по критерию суммарных энергозатрат позволяет установить, насколько эффективной оказывается экономия энергии, достигаемая как при эксплуатации зданий, так и в самих конструктивных решениях, и в какой степени эта экономия влияет на общий энергетический баланс в масштабах всей государственной экономики [12].

Исходя из предположения, что конструкции «легких» зданий являются менее энергоемкими, чем массивные конструкции традиционных зданий, проведем сравнение по энергозатратам пневматических сооружений из различных материалов при различных способах теплоизоляции с аналогичными традиционными сооружениями из дерева, стали и железобетона (рис. 16). Такое сравнение показывает, что наименьшей «первичной» энергоемкостью характеризуются воздухоопорные оболочки из полиэфирной ткани с покрытием из ПВХ. Те же оболочки, но изготовленные из стеклоткани с покрытием из ПТФЭ, требуют почти таких же энергозатрат, как и здания со стальными конструкциями, при однотипной теплоизоляции. Наиболее энергоемкими оказываются здания с железобетонными конструкциями. По отношению к ним энергозатраты для воздухоопорных оболочек из полиэфирной ткани с покрытием из ПВХ составляют около 43 %, а по отношению к зданиям со стальными конструкциями — около 58 %. Здания с деревянными конструкциями требуют расхода энергии на 13 % больше, чем воздухоопорные оболочки, которые, таким образом, оказываются оптимальными конструкциями по «первичным» энергозатратам.

¹ Принципы проектирования пневматических конструкций обобщены в «Справочнике по пневматическим сооружениям» (труды Института легких пространственных конструкций университета в Штутгарте, выпуск П. 15), опубликованном в предварительной редакции в ноябре 1974 г.

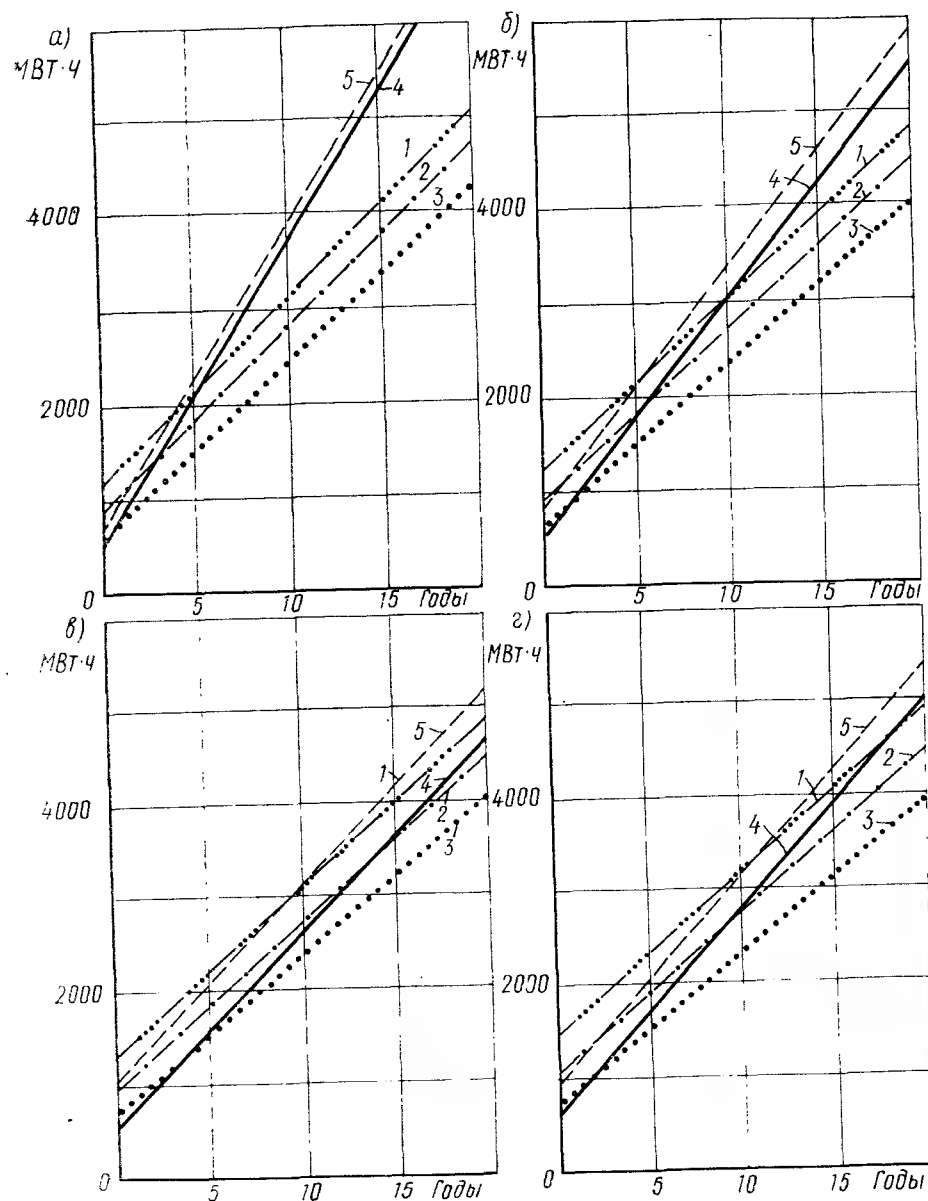


Рис. 16. Сравнение зданий различной конструкции по суммарным затратам энергии на изготовление, возведение и эксплуатацию

а — с теплоизоляцией согласно стандарту DIN 4108 E; б — с нормативной теплоизоляцией; в — с повышенной теплоизоляцией; г — с экономически оптимальной теплоизоляцией; 1 — здания с железобетонными конструкциями; 2 — то же, со стальными; 3 — то же, с деревянными; 4 — воздухоопорные оболочки из полиэфирной ткани, покрытой ПВХ; 5 — то же, из стеклоткани, покрытой ПТФЭ

Годовые энергозатраты на эксплуатацию воздухоопорных оболочек и зданий традиционной конструкции, при том же целевом назначении и одинаковом уровне теплоизоляции, отличаются в общем не существенно, но для воздухоопорных оболочек добавляется расход энергии на питание вентиляционных установок; эта добавка составляет 15—25 % общего расхода. Таким образом, даже если учесть возможность некоторого снижения энергозатрат на освещение оболочек благодаря использованию светопропускаемых материалов, оказывается, что здания с деревянными, а также со стальными и железобетонными конструкциями эффективнее в отношении эксплуатационных энергозатрат, чем пневматические сооружения.

Для полной оценки «энергетической эффективности» зданий различной конструкции необходимо учитывать суммарные затраты энергии, как «первичные» — на возведение зданий и на их разборку, так и эксплуатационные, относя их ко всему сроку эксплуатации. Такая оценка по приведенным суммарным энергозатратам показывает, что при коротких сроках службы наиболее эффективны воздухоопорные оболочки из полиэфирной ткани с покрытием из ПВХ; аналогичные здания с деревянными конструкциями оказываются более эффективными через 1—3 года эксплуатации, со стальными — через 3—13 лет, с железобетонными — только через 5—27 лет.

Заключение. В период с начала 60-х и до середины 70-х годов пневматические конструкции занимали господствующее положение по объемам производства среди строительных конструкций, изготовленных на основе технических тканей; наиболее широко они применялись в виде легких покрытий складов, сооружений для спорта, выставок и собраний. Это видно и из анализа существующих нормативных документов по мембранным конструкциям, в которых рассматриваются почти исключительно пневматические оболочки. Достоинствами таких сооружений являются быстрота изготовления и монтажа, а также возможность немедленного использования. Кроме того, воздухоопорные оболочки (в однослойном исполнении) наиболее экономичны в производстве, а разрешение на их применение, даже в первые годы, давалось органами строительного надзора без особых осложнений. Фактическая долговечность этих сооружений в большинстве случаев превышает расчетную: до сих пор эксплуатируются многие оболочки, гарантийный срок службы которых уже давно истек. Однако с середины 70-х годов производство однослойных воздухоопорных оболочек стало сокращаться, что объясняется по крайней мере тремя причинами:

спрос на сооружения, главными достоинствами которых являются быстрота и легкость возведения, постепенно падает в связи с общим ухудшением конъюнктуры в сфере строительства;

пневматические сооружения в отличие от традиционных требуют более совершенной и поэтому более дорогостоящей системы обслуживания; к тому же и надежность их сильно зависит от работы эксплуатационных служб;

общий рост стоимости энергии приводит к повышению расходов на воздухообеспечение пневматических сооружений, а для помещений, где требуется поддерживать температуру свыше 15°C, — и на их отопление; при применении же теплоизолированных оболочек значительно повышается стоимость материалов, изготовления и монтажа.

Если приходится констатировать постоянное сокращение объема строительства воздухоопорных сооружений «традиционного» типа, то в то же время наблюдается непрерывный рост общего объема применения пневматических конструкций. Примером тому является, как уже указывалось выше, гидротехническое строительство, где уже сейчас для самых различных целей применяют надувные шланги и пневмобаллоны; возможности использования пневматических конструкций в данной области еще далеко не исчерпаны. Можно ожидать, что в будущем основными областями применения пневматических конструкций станут энергетика, сельскохозяйственное хозяйство, защита от стихийных бедствий и охрана окружающей среды.

Что касается воздухоопорных конструкций, то для них наиболее перспективным с точки зрения экономики является направление, связанное с использованием самой оболочки как элемента системы энергоснабжения сооружения. Это практикуется уже сейчас, например при сооружении многослойных оболочек над плавательными бассейнами. В будущем воздухоопорные оболочки будут применяться преимущественно для перекрытия крупных комплексов для спорта и отдыха и даже целых жилых поселков, прежде всего в арктических районах, с целью обеспечения хотя бы минимального климатического комфорта для работающих там людей.

Выше уже говорилось о том, что не представляется возможным сколько-нибудь точно оценить соотношение объемов производства и применения пневматических и тентовых конструкций, где используются технические ткани. Однако можно смело утверждать, что, несмотря на снижение объема производства воздухоопорных оболочек, уменьшения производства мягких тканевых конструкций в целом не наблюдается. В области их применения произошли определенные изменения, но в общем она расширилась. Воздухоопорным сооружениям принадлежит честь быть первыми в этом развитии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otto, F. und Trostel, Rudolf. Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 1. Ullstein Fachverlag, Frankfurt/Berlin, 1962.
2. Herzog, Thomas. Pneumatische Konstruktionen — Bauten aus Membranen und Luft. Gert Hatje, Stuttgart, 1976.
3. Schlaich, Jörg und Greiner Swietbert. Vorgespannte Flächentragwerke aus Metallmembranen; in Bauingenieur 53, 1978, Seite 77—87. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—Wien, 1978.
4. Oelbermann, Jobst. Numerisch nicht lineare Untersuchungen an plastisch geformten Metallmembran—Konstruktionen unter Berücksichtigung der Faltenbildung, 1978.

5. Institut für Wasserbau, Institut für leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart. Gedanken zur Sicherung von Kanalbauwerken. Stuttgart, 1981.
6. Büschges, Werner. Schwimmkissen und Schiffshebesäcke; in: Bubner, Baier, Koenen, Oelbermann (Hrsg.): Membrankonstruktionen 2, Seite 51—58. Rudolf Müller, Köln—Braunsfeld 1981.
7. Bubner, Ewald. Zur konstruktiven Ausbildung der Wärmedämmung bei Bauwerken aus textilen Materialien; in: Bubner, Baier, Koenen, Oelbermann (Hrsg.): Membrankonstruktionen 1. Rudolf Müller, Köln—Braunsfeld, 1979.
8. Linecker, Josef. Mehrschichtige Membrankonstruktionen zur Energieeinsparung und KGewinnung, in: Bubner, Baier, Koenen, Oelbermann (Hrsg.): Membrankonstruktionen 1, Seite 49—59. Rudolf Müller, Köln—Braunsfeld, 1979.
9. Institut für leichte Flächentragwerke. Pneukatalog; in: IL 12, Wandelbare Pneus. Universität Stuttgart, 1975.
10. Innenministerium des Landes Nordrhein—Westfalen. Richtlinien für den Bau und Betrieb von Tragluftbauten, Rd. Erl. d. Innenministers v. 30.8.1971 — VA3—2.000.69 Nr. 2110/71, Düsseldorf, 1971.
11. DIN 4134, Entwurf. Tragluftbauten; Berechnung, Ausführung und Betrieb, 1979.
12. Baier, Bernd. Membrankonstruktionen 3 — Energetische Bewertung luftgetragener Membranhallen im Vergleich mit Holz-, Stahl- und Stahlbetonhallen. Rudolf Müller, Köln—Braunsfeld, 1982.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ В ФИНЛЯНДИИ

Л. Виттинг (Финляндия)

Начальный этап. История финских пневматических сооружений связана прежде всего с историей фирмы «Рукка-продуктс АВ». Ее деятельность по изготовлению надувных конструкций началась в июне 1964 г., когда автору этой статьи после переговоров с Роджером Стёрлингом — вице-директором нынешней фирмы «Рукка» — было поручено смонтировать пневматическое сооружение к середине лета того же года. На осуществление проекта было отведено всего две недели, поэтому времени для подробной разработки проекта не оставалось. Не было также необходимых технических тканей, компрессоров и других важных компонентов, которые требовались для работы.

Таким образом, пришлось все начинать с нуля. Это оказалось положительным фактором, так как экспериментаторы были лишены возможности копировать деятельность других фирм и повторять их ошибки. Единственно возможным выходом из этой ситуации был путь экспериментов с целью нахождения способа использования тех материалов, которые к тому времени выпускались фирмой «Рукка».

Первый воздухоопорный купол диаметром 28 м высотой 8,75 м находился в эксплуатации недолго. Испытание этой конструкции показало, что поливинилхлоридная пленка толщиной 0,3 мм не совсем пригодна для сооружений таких размеров. Кирпичные пригрузки или балластные мешки, укладываемые на наземные фарту-

ки оболочки, оказались недостаточно надежным анкерным устройством для обычной воздухоопорной конструкции.

Несмотря на неудачу первого эксперимента, а может быть, именно благодаря ей исследование надувных конструкций было продолжено. К тому же фирма не теряла надежду в будущем компенсировать потери. Авторы проекта были единодушны и последовательны. В том же году были сооружены еще две конструкции, обе из плащевого нейлона оранжевого цвета массой 90 г/м², армированного акрилом. Второй воздухоопорный купол диаметром 29 м и высотой 9 м испытывался в течение двух месяцев, пока не был поврежден во время грозового ливня, когда конструкция оказалась разгерметизированной.

Материал второго сооружения был использован для изготовления третьего в виде цилиндра со сферическими торцами размером 37×17,5×7,5 м. Эта конструкция использовалась в качестве раздевален для участников спортивных состязаний и выставочных помещений в течение многих лет. Она выдержала первые зимние испытания 1966 г.

Наблюдения над данной конструкцией позволили обобщить опыт и продолжить эксперименты. Было обнаружено, например, что освещение внутри помещения из-за светопропускающих свойств оранжевой ткани вызывало сильное раздражение зрения при ясной солнечной погоде. Впрочем, этот нежелательный эффект был легко устранен. Другое явление наблюдалось в безветренные теплые солнечные дни. Нагрев солнцем способствовал тому, что замкнутая оболочка поддерживалась теплым воздухом даже тогда, когда вентиляторы были выключены, однако из-за перегрева воздуха находиться в помещении было затруднительно вплоть до захода солнца.

В 1965 г. было возведено небольшое выставочное сооружение с водяным балластным мешком в качестве анкера. Оболочка была выполнена из прозрачной поливинилхлоридной пленки, покрытой с одной стороны полиамидом; общая масса пленки составляла примерно 250 г/м².

В первых объектах давление воздуха колебалось от 50 до 100 Па, а в пятом сооружении оно уже было поднято приблизительно до 200 Па. Однако и это давление далеко не всегда было достаточным.

В отличие от своих скандинавских конкурентов, которые к этому времени оснастили воздухоопорные здания светящимися табло с предупреждением, что давление воздуха под оболочкой не должно превышать 180 Па, фирма «Рукка» подняла давление до 300—350 Па для обычных сооружений. Предусмотрительность этой меры подтвердилась уже во время сентябрьского урагана в 1969 г., когда были разрушены около 300 шведских пневматических сооружений.

Экспериментальные исследования. Уже со дня своего основания в 1950 г. фирма «Рукка» выделяла достаточно времени и средств на проведение экспериментов; и в немалой степени — на исследование пневматических строительных конструкций (рис. 1).

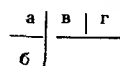
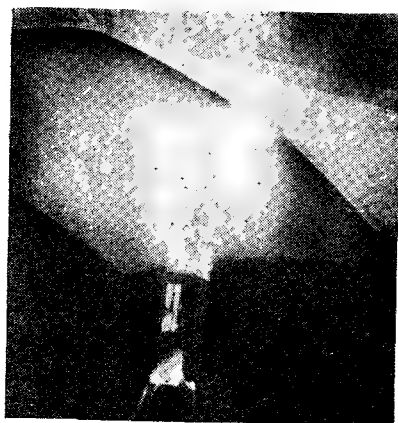
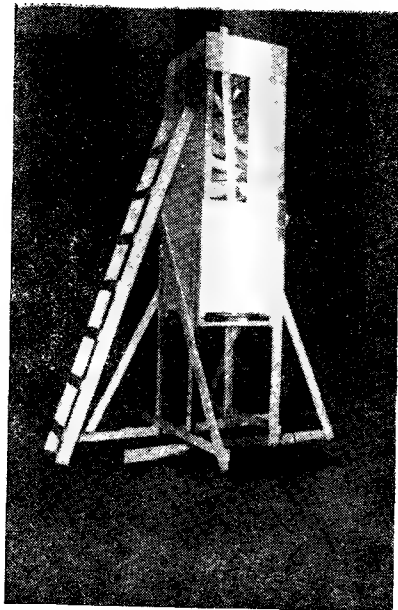


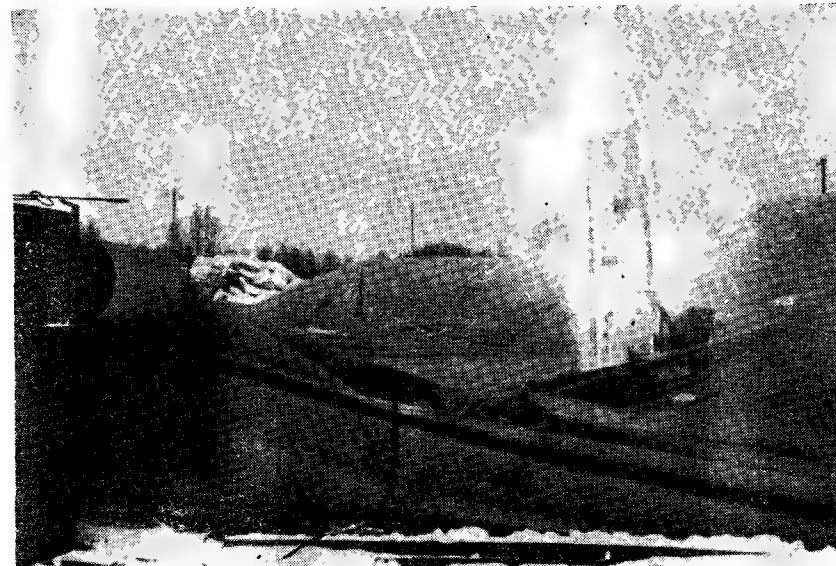
Рис. 1. Огневые испытания воздухоопорного сооружения

а — фанерная будка, наполненная дровами — источник пожара; б — прогорание оболочки, вид изнутри; в — то же, вид снаружи; г — окончательная фаза пожара — оболочка прогорела и опустилась, потухнув; будка продолжает гореть

Одним из первых мероприятий фирмы было освоение высокочастотной сварочной машины, предназначенной для изготовления крупных оболочек.

В то время ни на отечественный, ни на зарубежный рынки еще не поступали машины такого типа. Однако сейчас подобные машины уже имеются. Например, в 1980 г. была изготовлена мембрана днища бассейна размером 100×200 м и массой 20 т, которую доставили к месту монтажа как цельную конструкцию. Это был своего рода мировой рекорд.

Уже при испытаниях первых образцов специалисты обратили особое внимание на те недостатки в проектах, которые отражались на конструкции. Разность давлений, например, создает усло-



вия, при которых форма конструкции изменяется. Многое зависит также от формы и раскроя ткани, из которой изготовлена оболочка.

Чтобы установить оптимальное распределение натяжений, в течение нескольких лет были испытаны десятки малых моделей. После долгих поисков нашли такую форму, при которой нежелательная неравномерность натяжений может быть сведена до минимума. В соответствии с этой формой были произведены расчеты. Оболочка с горизонтальными швами — результат кропотливой исследовательской деятельности, своего рода открытие. Фирма «Рукка» первая обнаружила преимущества такой формы раскроя конструкций.

В 1974 г. были произведены предварительные расчеты пневматических конструкций.

В данной статье приведены результаты расчетов воздухоопорных оболочек на действие ветра и снега (рис. 2). Эти расчеты основаны, главным образом, на теории, предложенной проф. В. В. Ермоловым в 1977 г. в Венеции¹.

Оборудование воздухоопорных зданий. Помимо экспериментов, направленных на разработку материалов оболочек, проводились также исследования по усовершенствованию комплектующего оборудования и деталей: воздухоподающих и отопительных установок (рис. 3), дверных запоров, контролирующих устройств разного рода и крепежных комплектов.

¹ V. V. Yermolov. On methods of determining a cylindrical shell profile deformed by wind pressure — International Symposium on Air Supported Structures in Venice, June 1977, Annex 1.

Фирма «Рукка» с самого начала придерживалась принципа: «качество воздухоопорного здания зависит от качества его дверей». Индивидуальные и общешлюзовые камеры первых сооружений были снабжены дверями на шарнирных петлях, однако одностороннее давление воздуха затруднило их использование. В 1969 г. сконструировали тип шлюзовой камеры из ткани, смонтированной на металлических дугах (рис. 4). Этот тип шлюза после доработки был введен в эксплуатацию в 1971 г. Он был снабжен смещаемыми пневматическими дверями, которыми можно было управлять либо вручную, либо автоматически.

Почти одновременно была сконструирована дверь, в которой предусматривалось противодействие давлению воздуха. Эта дверь, оборудованная комбинированным вращающимся и скользящим подшипником, при открывании вращалась вокруг вертикальной оси и в то же время скользила.

В первые годы воздухоопорные здания снабжались зарубежными резервными воздухоподающими установками, которые выравнивали внешнее и внутреннее давления во время возможных штормов. Агрегаты были довольно дорогими, их контрольная автоматика не была рассчитана на эксплуатацию в надувных конструкциях. Они нуждались в доработке и приспособлении к специфическим условиям работы.

Поэтому фирма «Рукка» начала разрабатывать особый тип запасного вентилятора, который с незначительными изменениями был запущен в производство с 1972 г. Преимущество такого вентилятора заключалось в том, что он срабатывал уже через 5 с после начала шторма, в то время как аналогичный агрегат ФРГ срабатывал приблизительно через 45 с. Именно из-за этой задержки происходило разрушение многих воздухоопорных сооружений в ФРГ во время зимних штормов 1972—1973 гг.

Далее требовались отопительные установки. Воздушные калориферы на жидком топливе, сконструированные для более теплых климатических поясов, оказались неприменимыми в тяжелых зимних условиях Финляндии.

То же самое можно сказать и об агрегатах, которые предназна-



Рис. 3. Отопительная установка, подающая теплый воздух

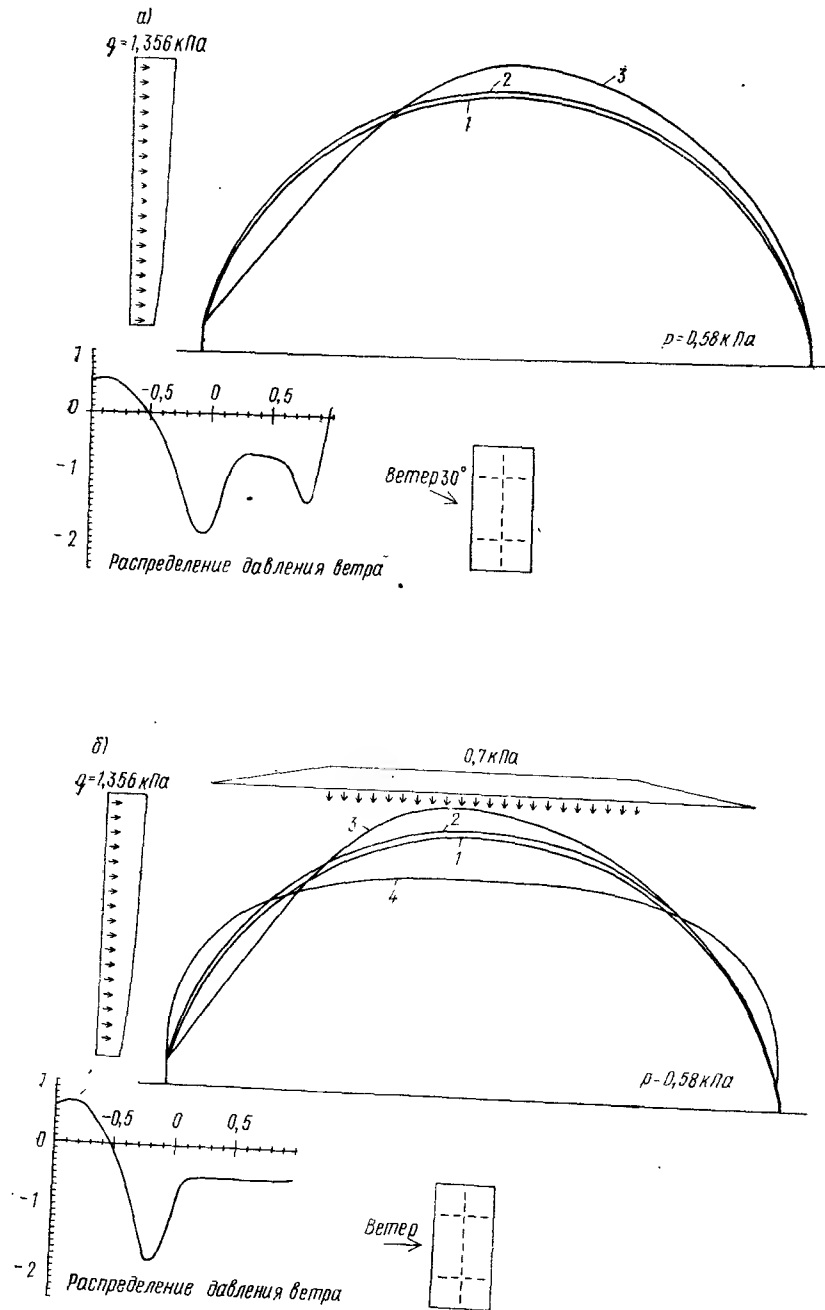


Рис. 2. Перемещения цилиндрической оболочки

а — под действием ветра под углом $\pm 30^\circ$ к поперечной оси; б — под действием ветра (1,356 кПа), перпендикулярного к продольной оси, и снега (0,7 кПа); 1 — начальная форма; 2 — исходная форма; 3 — под действием ветра; 4 — под действием снега

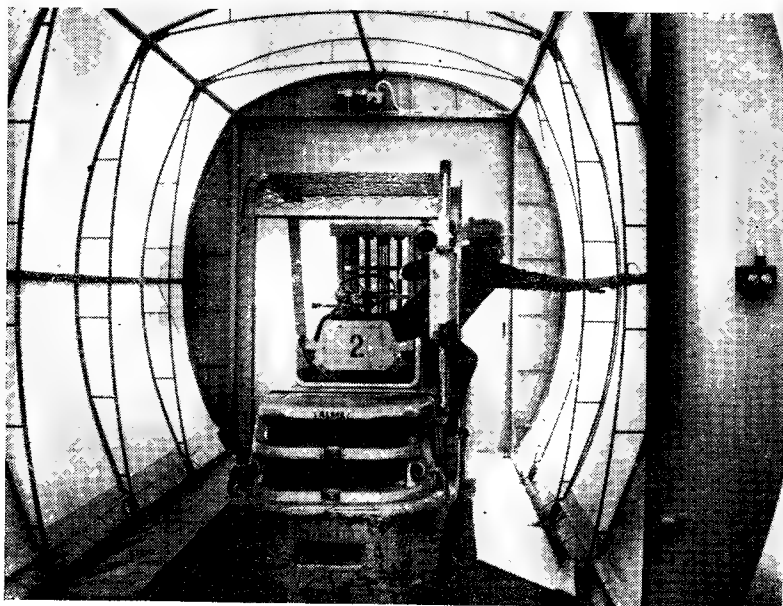


Рис. 4. Моментально закрывающиеся маневрируемые двери

чались для использования в конструкциях, находящихся в менее холодных климатических зонах. Уже после трех месяцев эксплуатации теплообменники разных типов или выходили из строя, или их заклинивало.

Фирме «Рукка» удалось сконструировать тип воздушного калорифера для воздухоопорных зданий, который практичен и обладает высокими эксплуатационными качествами; при бережном уходе теплообменники работают 5—6 лет.

Чтобы снизить расходы по наблюдению за пневматическими конструкциями, фирма «Рукка» разрабатывает систему автоматической регулировки давления в своих сооружениях, которая во многих отношениях уникальна.

Одна из основных сложностей регулировки давления состоит в том, что при ураганных ветрах датчик скоростного напора ветра может работать неточно. В зависимости от направления ветра по отношению к точке, где измеряется давление, разница в показаниях может колебаться более чем на 100 %. Эту систему регулировки дополнили достаточно точным и в разных ситуациях надежным датчиком давления, который в свою очередь реагирует на показания датчика натяжения материала оболочки. Давление, таким образом, регулируется в зависимости от того, стабильно ли держится натяжение.

О ветровых и снеговых нагрузках сигнализируют индикаторы, установленные в разных точках ткани.

Когда оболочка начинает колебаться под действием сильного ветра, автоматика поднимает давление настолько, чтобы частота колебаний не превышала 5—10 Гц, и когда колебания прекращаются, то давление снижается в течение 10—15 мин.

Снеговая нагрузка изменяет исходный угол¹ ткани, автоматика же стремится сохранить его путем повышения давления. Кроме того, в функцию автоматики входит включение в случае необходимости запасных вентиляторов. Когда давление понижается или повышается до определенного уровня, индикатор сигнализирует об опасности.

Преимущество этой системы состоит в том, что регулировка давления повышает надежность воздухоопорных зданий. При безветренной погоде они могут функционировать в режиме низкого давления в течение большого промежутка времени. В отапливаемых зданиях снижаются расходы на топливо. Кроме того, при понижении давления уменьшаются утечки воздуха.

В первые годы для анкерного крепления оболочек применяли в основном винтовые сваи глубиной 1 м с диаметром диска 15 см. Сваи заглубляются электрическими бурами, управляемыми двумя рабочими. Сваи могут выдерживать выдергивающее усилие от 8 до 15 кН в зависимости от свойств грунта. Анкерные усилия передаются материалу оболочки через гальванизированные трубы, вставленные в кромочные карманы оболочки на уровне земли.

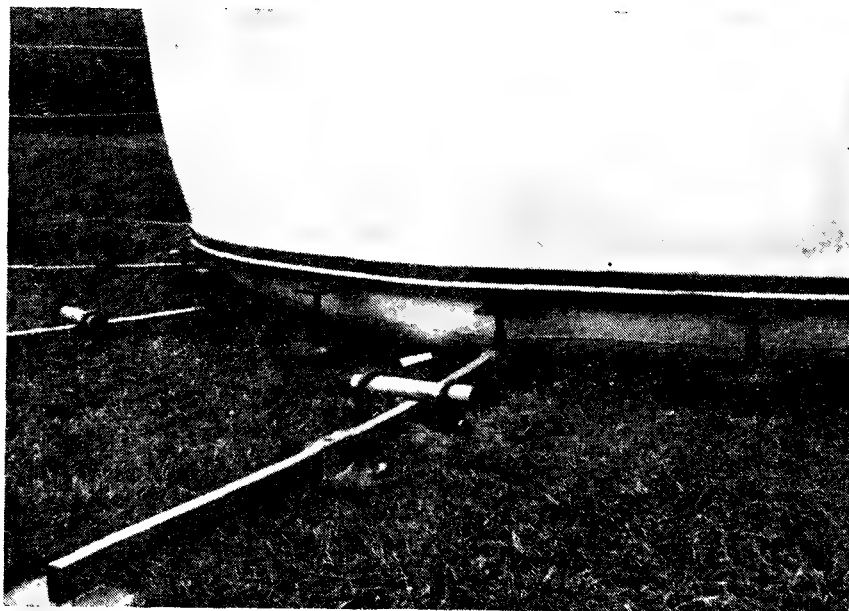
Сейчас испытывают новые методы крепления свай в замерзший или каменистый грунт. Вместо трубы в карманы нижней кромки оболочки закладывают канат, и ткань крепят между угловым профилем и плоской накладкой. Это устройство, в свою очередь, крепится анкерами, заглубляемыми в грунт на 1 м (рис. 5).

Для определенных типов надувных конструкций, например для большинства экспортируемых сооружений, используются бетонные основания, не требующие дополнительной подгонки.

Фирма «Рукка» в сотрудничестве с изготовителями осветительной арматуры разрабатывает специальную арматуру, подвешиваемую к оболочке (рис. 6, 7). Строительные нормы ФРГ и США запрещают подвешивать осветительную арматуру или другие предметы к оболочкам, но эти нормы при правильном подходе могут быть пересмотрены. Практика показала, что дополнительный вес уменьшает колебания ткани при ветре. Подвесные светильники, которые изготавливает «Рукка», были испытаны на нагрузку 12 кН, так что безопасность в этом случае полностью обеспечена.

Серийное производство. Весной 1965 г. было смонтировано первое воздухоопорное здание для торгово-рекламных целей. Оно представляло собой небольшой купол типа «Иглу», изготовленный из бесцветной поливинилхлоридной пленки. Этот материал не очень хорош для пневматических конструкций: он непрочен, неосторожное обращение может нанести ему значительный вред. К тому же

¹ Имеется в виду угол, составленный касательной к оболочке в месте анкерки и горизонтом (Прим. ред.).



5 | 6
| 7

Рис. 5. Опорное устройство рекламной башни (см. рис. 18)

Рис. 6. Складское помещение

Рис. 7. Двухслойная оболочка над хоккейным полем в Эсбо (1978 г.)

воздух под оболочкой сильно нагревался солнцем. Тем не менее сооружение себя вполне оправдало — за четыре года в нем было проведено около 20 выставок.

В 1967 г., после того как финская промышленность приступила к производству технических тканей, соответствующих назначению и эксплуатационным потребностям пневматических конструкций, началось коммерческое производство выставочных зданий (рис. 8). В том же году были изготовлены два выставочных павильона, дансинг-холл, два теннисных корта и здание амбулатории.

Ко времени написания этой статьи последнее сооружение находилось в эксплуатации около 15 лет и может прослужить еще много лет. Один из выставочных павильонов также все еще находится в эксплуатации. Из долговечных сооружений можно упомянуть дансинг-холл площадью 1120 м², изготовленный с применением сварных швов.

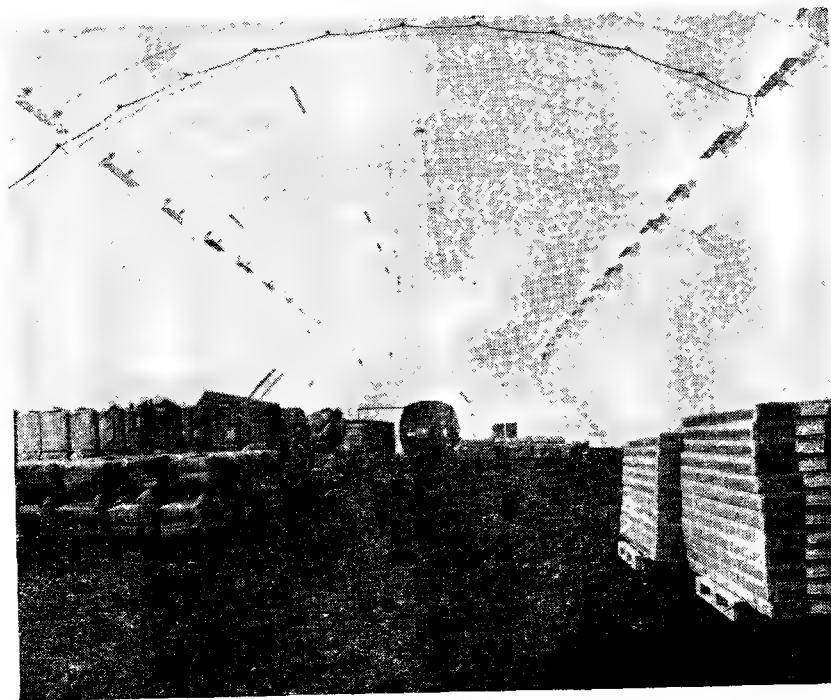




Рис. 8. Выставочные павильоны в Таммерфорсе

В 1968 г. был смонтирован манеж для верховой езды в виде приплюснутой оболочки вращения, а затем — воздухоопорное покрытие для сточного бассейна бумажной фабрики (рис. 9). В следующем году был построен плавательный бассейн для г. Гамлакарлебю. Бассейн находился в эксплуатации уже более 12 лет. Для снижения расхода тепла в 1977 г. оболочка была утеплена внутренним слоем ткани. В 1979 г. проводили испытания прочности материала, чтобы выяснить, может ли сооружение находиться в эксплуатации еще несколько лет или же требуется новое покрытие плавательного бассейна. Испытания показали, что хотя первоначальная прочность материала (основа/уток) $3,6/2,6$ кН/5 см снизилась до $1,47/1,21$ кН/5 см, оставался еще более чем 5-кратный запас прочности для наименее благоприятных метеорологических условий.

В 1969 г. смонтировали сооружение для разведения рыбы, два торговых павильона и одно здание для винодельческого производства. Кроме того, были возведены воздухоопорные здания рекреационного назначения, здания теннисных кортов (рис. 10), кемпингов и т. п.; изготовлено первое сооружение для экспорта в СССР — спортивный зал университета в Тарту.

Из продукции 1970 г. можно упомянуть сооружения промышленного назначения (рис. 11, 12), помещение для продажи подержанных автомобилей и специальные здания для дискотек и дансингов.

Новые возможности использования воздухоопорных зданий были найдены в 1971 г., когда смонтировали оболочку, служащую промежуточным цехом для полуфабрикатов при целлюлозной фабрике.

В том же году было изготовлено сооружение, которое функционировало как зал ожидания для пассажиров в одном из крупнейших портов в Финляндии, а также построен зимний спортивный комплекс в г. Форсса (рис. 13) в виде купола диаметром 73,4 и высотой около 19 м, общей площадью 4320 м² и объемом $46\,000$ м³. Прочность ткани составляла $5,5/5,0$ кН/5 см, масса около 1350 г/м².

Из других сооружений, построенных в 1971 г., можно упомянуть здание размером 100×20 м для складирования бумагообработывающих машин. Объем его невелик — 5000 м³, в то время как объем обычных сооружений к этому времени доходил уже до $25\,000$ м³. Для уменьшения опасности коррозии машин в здании находился агрегат для осушения воздуха. После нескольких лет эксплуатации сооружения в качестве складского помещения владелец установил прибор, который обеспечивал автоматический режим работы вентилятора. Вентилятор работал около 30 с, а затем в течение 1 мин бездействовал. При урагане давление ветра настолько поднялось, что внутреннее давление препятствовало включению вентилятора. Последствия такой экономии электроэнергии оказались плачевными: оболочка разгерметизировалась.

В 1971 г. было сооружено самое большое в Финляндии воздухоопорное здание размером 128×38 м, занимавшее площадь около

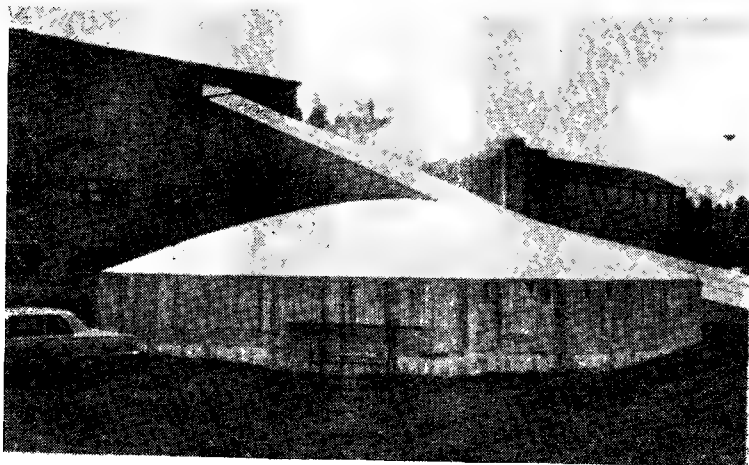


Рис. 9. Воздухоопорный купол сточного бассейна

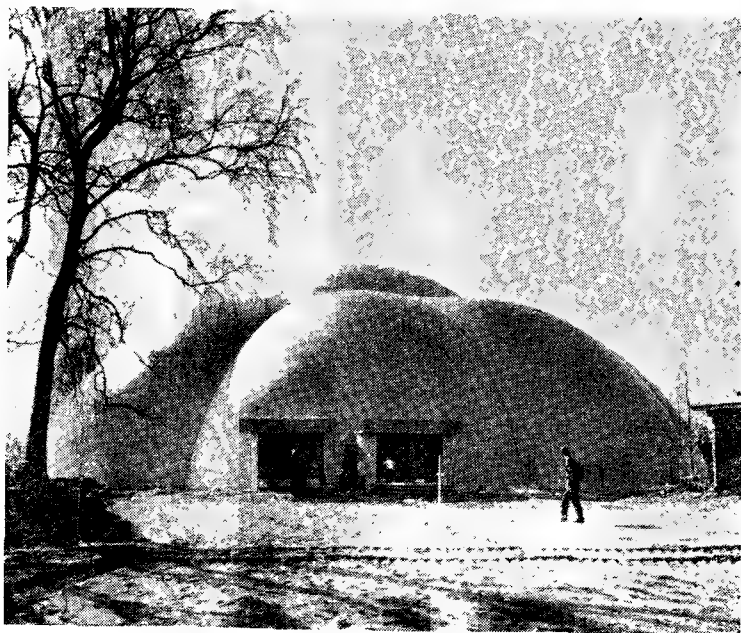


Рис. 10. Оболочка сооружения рекреационного назначения в Пори

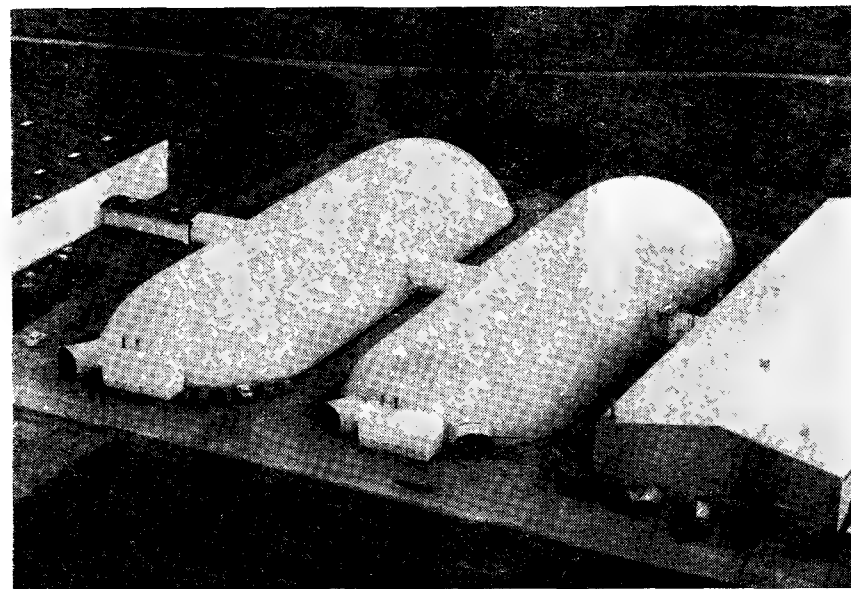


Рис. 11. Складские помещения

0,5 га. Оно экспонировалось в СССР, и оказалось, что это самое большое здание такого типа в Европе.

В 1975 г. в Финляндии пневматическое сооружение использовалось в качестве передвижной фабрики-кухни при большом промышленном предприятии. В том же году подобное сооружение, служившее складом запчастей для автомобилей, было смонтировано на крыше действующего завода по ремонту автомобилей (рис. 14).

В 1975—1977 гг. надувные конструкции применялись в качестве теплиц. Этот опыт дал хорошие результаты. Растения хорошо развивались, качественные и количественные показатели урожая были высокими. Покрытием служила паутиная ткань (2×4 нити в 1 см), покрытая поливинилхлоридом. Для изготовления оболочки использовали два слоя этого материала, имеющего коэффициент теплопередачи менее $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и светопропускаемость 79%. Давление, температура и влажность воздуха регулируются автоматически, хотя автоматике задаются противоречивые требования. Овощи, выращенные в такой теплице — салат, помидоры и огурцы — обладают более высокими вкусовыми качествами, чем выращенные в традиционных теплицах.

Принципиальное различие между традиционными и надувными теплицами заметно, например, в период обработки земли в феврале, когда начинается тепличный сезон, а мерзлота проникает в грунт на 1 м и более. В традиционной теплице с воздушным отоплением и электрообогревателями, заглубленными в почву, процесс



Рис. 12. Коническая оболочка склада сыпучих материалов объемом 1500 м^3 в Тампере, опущенная на насыпанный конус



Рис. 13. Покрытие хоккейного поля в Форсса

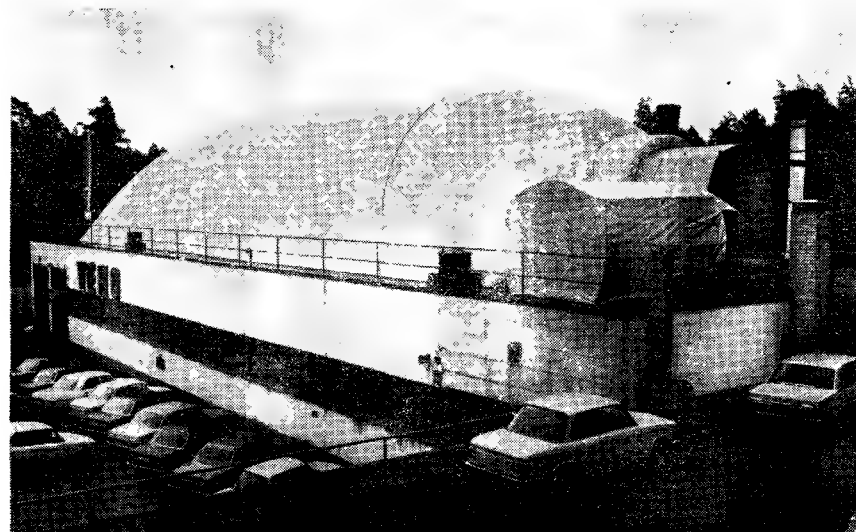


Рис. 14. Резервный склад на крыше завода в Хельсинки

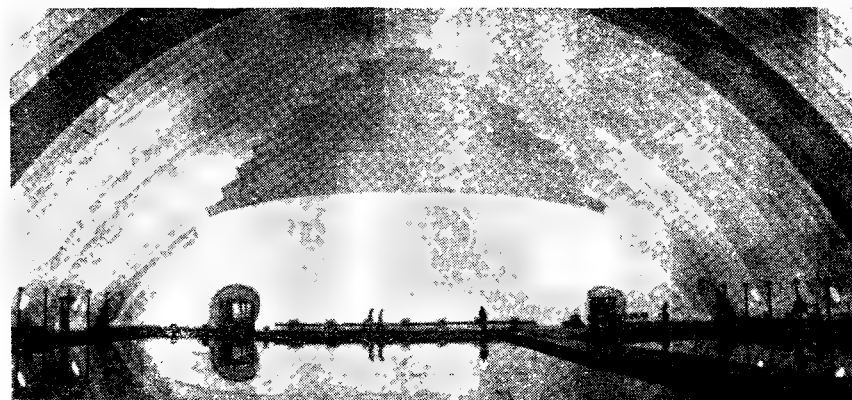


Рис. 15. Плавательный бассейн в Варшаве

оттаивания мерзлого слоя занимает около недели. Тот же процесс в надувной теплице длится примерно трое суток.

К сожалению, оказалось, что наружная пленка, несмотря на гарантии изготовителей, после двух лет эксплуатации потемнела, сохранив лишь около 50 % светопропускаемости, и света оказалось недостаточно для растений, находящихся в районе 64° северной широты.

В 1975 г. в Варшаве (рис. 15) было установлено покрытие открытого плавательного бассейна размером $64 \times 42,2 \text{ м}$. В том же

году сконструировали трехкортный теннисный зал, ширина которого могла варьироваться, а высота оставалась постоянной. В 1977 г. его перевезли в Нью-Йорк.

В 1979 г. в Хельсинки был сооружен спортивный зал размером 85×55 м. Он имел самый большой пролет из всех изготовленных фирмой «Рукка» сооружений. Перечень воздухоопорных зданий, изготовленных фирмой «Рукка», приведен в таблице.

Воздухоопорные здания, изготовленные фирмой «Рукка» и введенные в эксплуатацию до 1980 г.

Объекты	Число	%	Суммарная площадь	
			м²	%
Экспериментальные	10	3,7	4 770	1,4
Спортивные залы	44	16,2	72 410	21,2
Выставочные павильоны	33	12,1	80 120	23,5
Дискотеки и дансинги	7	2,6	6 420	1,9
Складские помещения	142	52,1	149 800	43,8
Промышленные помещения	22	8,1	15 840	4,6
Магазины	7	2,6	9 010	2,6
Прочие	7	2,6	3 290	1,0
Итого	272		341 660	

Помимо зданий, построенных фирмой «Рукка», еще три финских предприятия возвели в общей сложности 15 объектов. Но затем все эти фирмы по тем или иным причинам прекратили производство пневматических конструкций. В настоящее время в Финляндии многие предприятия изготавливают каркасно-тканевые сооружения.

Финляндия в последние годы импортировала десятки пневматических сооружений. До того как фирма «Рукка» начала производство надувных конструкций, финская армия купила одно воздухоопорное сооружение в ФРГ и одно в Швеции. Шведский спортивный зал был куплен в 1974 г. для Хельсинки, три складских помещения были закуплены разными отечественными предприятиями и примерно столько же шведы приобрели в Финляндии.

Влияние энергетического кризиса на производство и эксплуатацию пневматических конструкций. Повышение цен на разные виды энергии в середине 70-х гг. привело к значительному уменьшению спроса на пневматические конструкции. Эта тенденция характерна для 70-х годов в целом. Для обеспечения конкурентоспособности пневматических конструкций был принят ряд мер по экономии электроэнергии в воздухоопорных зданиях.

Здания делали более герметичными, двери, замки и крепления усиливали уплотнительной пленкой, применяли вентиляторы оптимальной мощности, так что воздухоподача была сокращена приблизительно на 1/3. Соответственно уменьшался и уровень шума.

Расход тепла также может быть снижен путем повышения теплоизоляции оболочек.

Зимой 1975 г. была сооружена маленькая оранжерея с трехслойной оболочкой. В том же году к оболочке одного из зданий изнутри прикрепили огнестойкую поливинилхлоридную пленку. Как теплоизоляция она оправдала надежды, но неармированная пленка оказалась недостаточно прочной, в связи с чем ее укрепили поливинилхлоридной нитью. Этот тип нитей используется и сейчас.

В том же году были изготовлены первое воздухоопорное здание торгового назначения, обшитое изнутри тканью, спортивный зал на юге Финляндии и теплица размером 40×20×7 м с трехслойной оболочкой (рис. 16).

В 1977 г. плавательный бассейн в Карлебу был оснащен внутренней тканевой оболочкой. Был также сооружен теннисный корт с двухслойной оболочкой (рис. 17).

В Финляндии разработан особый вариант внутренней оболочки для воздухоопорных конструкций. Каждый слой ткани раскраивают отдельно, а затем их соединяют друг с другом пластиком в процессе монтажа здания. Между двумя тканевыми оболочками находится слой воздуха толщиной 10—20 см, таким образом внутренняя оболочка может обходиться без отверстий, и стыки слоев ткани не промерзают. Эта теплоизоляция более высокого класса, чем та, которую может сейчас предложить большинство конкурирующих фирм. Прикрепление внутренней оболочки производится во время монтажа здания и занимает от 1 до 4 ч в зависимости от его площади¹.

Производство, транспортировка и монтаж здания в значительной степени упрощаются благодаря тому, что внешняя и внутренняя оболочки раздельны. Преимущество данного способа состоит в том, что появляется возможность теплоизолировать оболочки зданий, уже находящихся в эксплуатации.

Теоретически коэффициент термического сопротивления оболочек увеличился приблизительно на 60 %, но практическая экономия теплоизоляционных расходов составила примерно 40 %, поскольку утечки воздуха от изоляции не зависят.

Шведская система теплоизоляции воздухоопорных зданий с помощью прикрепления с внешней стороны огнестойкого пенопласта толщиной 25 мм также была апробирована в Финляндии. Эта система сокращает расход тепла примерно на 60 %, но расходы на такую теплоизоляцию, конечно, значительно выше, чем на изоляцию с помощью внутренней обшивки, к тому же толстый слой пенопласта не пропускает дневного света.

Ко времени написания этой статьи в Финляндии была изготовлена внутренняя обшивка для 16 воздухоопорных зданий. Из них четыре предназначены для экспериментальных целей, остальные — для заказчиков. Одно здание было оснащено теплоизоляцией из

¹ Двухслойная оболочка смонтирована фирмой «Рукка» над теннисным кортом бассейна «Чайка» в Москве (Прим. ред.).



Рис. 16. Выращивание салата под трехслойной воздухоопорной оболочкой

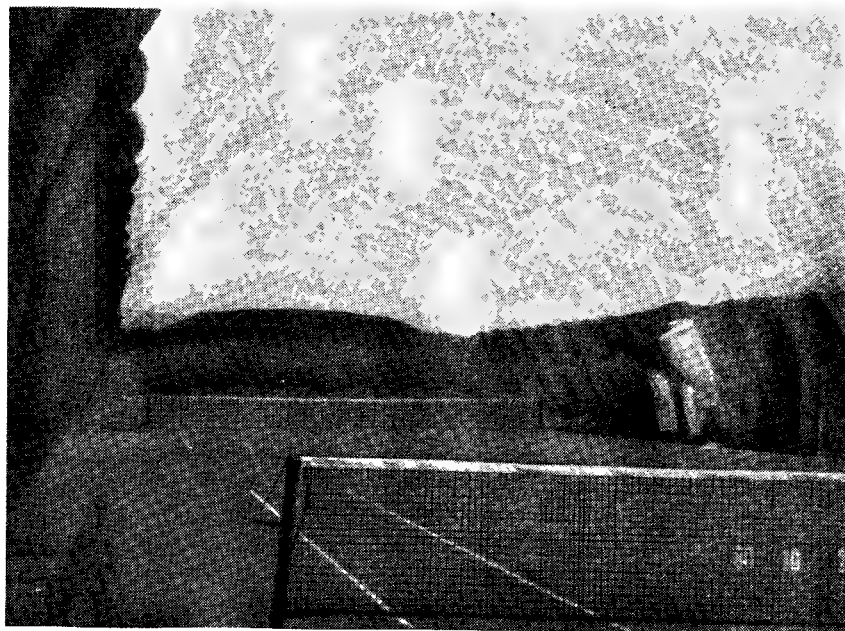


Рис. 17. Двухслойная оболочка над теннисными кортами в Хельсинки (1980 г.)

пенопласта по системе, запатентованной шведской промышленностью.

Специальные конструкции. В течение нескольких последних лет было спроектировано и возведено множество пневматических сооружений специального назначения.

К ним относятся прежде всего башни для рекламы. Первая башня конической формы имела высоту 20 м, диаметр основания приблизительно 4 м и диаметр верха 1 м. Башня была оснащена световыми поясами для рекламы и использовалась на многих выставках и ярмарках. Другая башня имела диаметр 4 и высоту 30 м, затем ее удлинили до 32 м (рис. 18). На этой башне также были размещены пояса для рекламы. Она имела большой успех и вызывала сенсацию своими грандиозными объемами.

В последние годы были сооружены еще две башни для рекламы. Одна из них — для завода прохладительных напитков — имела форму бутылки диаметром 10 и высотой 16 м (рис. 19). Она, как и предыдущие башни, была снабжена вращающейся дверью для посетителей, а во внутреннем помещении размещалась различная реклама. Другая башня имела диаметр 5 м у основания и сужалась до 4 м в вершине, на высоте 20 м. Эта башня была оборудована наружным рекламным щитом из тяжелой ткани. Обе башни рассчитаны на максимальную скорость ветра 15 м/с.

Опыт показал, что вентиляторы целесообразно снабжать шумопоглотителями как с наветренной, так и с подветренной сторон, чтобы достичь приемлемого уровня шума в сочетании с необходимым повышенным давлением воздуха.

Для улучшения акустики помещения два дансинга были устроены с вывернутым внутрь куполом (рис. 20). Свежий воздух подавали в помещение через маленькие отверстия во внутреннем куполе, чтобы обеспечить как можно более равномерное распределение его по всему залу. Основание этих сооружений имело не круглую форму. Оболочка разделена на 6—8 секций, внутри которых радиус опорного контура варьировался от минимума до максимума. Волнообразное поперечное сечение купола постепенно менялось по высоте, так что верхняя часть внутреннего купола приобретала круговую форму. Следует подчеркнуть, что такой тип внутренней обшивки, разработанный в Финляндии, значительно улучшает акустические показатели воздухоопорных зданий.

Из ткани же изготовляют пневматические баллоны, предназначенные для использования при работах, выполняемых Управлением дорожного и гидротехнического строительства Финляндии. Они могут также использоваться для различных пущ водного транспорта. Первые модели показали, какой должна быть оптимальная форма баллона при минимальной высоте. Модели были рассчитаны на грузоподъемность 5 и 10 т. Сейчас имеется возможность производить цельнокроенные баллоны грузоподъемностью от 2 до 200 т в двух разных вариантах, так называемые круглая и плоская модели.



Рис. 18. Рекламная башня диаметром 4 и высотой 32 м на выставке в Таммерформе (см. рис. 8); ее опорные крепления см. на рис. 5

В конце 60-х годов были проведены эксперименты по изготовлению подобных больших мешков из ткани, покрытой поливинилхлоридом. Мешки объемом 750 и 1500 м³ устанавливали на плоскую подставку и надували небольшим компрессором. Перед каждым



Рис. 19. Рекламное сооружение в форме бутылки диаметром 10 и высотой 16 м

Рис. 20. Покрытие дансинга с вывернутым внутрь куполом

новым сезоном мешки очищали, из них выпускали воздух, а затем рабочие проводили необходимые ремонтные операции внутри мешка. Через несколько лет эти эксперименты прекратили, потому что не было найдено удовлетворительного решения проблемы защиты от грызунов.

В 1974—1975 гг. фирма «Рукка» провела серию интересных экспериментов по использованию пневматических конструкций в судостроительной практике по финскому патенту. Между грунтом и дном судна устанавливали плотные мешки, наполненные водой до



необходимого давления (рис. 21). Таким образом обеспечивалась подъемная сила 1—2 МН в зависимости от тоннажа судна. Мешки были изготовлены из плотной ткани, имели размер 5×2 м и давление в них могло достигать максимум до 0,2 МПа. Этот эксперимент дал удовлетворительные результаты. Маленькие суда, для которых использовались эти мешки, легко маневрировали. Но в тех случаях, когда требовалось много мешков, наполненных водой, приходилось ими управлять через отдельные вентили регулировки давления, так как не во всех мешках образовывалось одинаковое давление.

Тентовые покрытия. К тентовым покрытиям относятся мембранные конструкции, где напряжение ткани достигается не за счет разности давлений. Сюда относятся, например, каркасно-тканевые покрытия, где материал натягивается по-разному расставляемыми рамами из металла или дерева.

Монтаж таких покрытий выполняют следующим образом: оболочку, которая обычно сварена одним или несколькими швами, устанавливают на уже подготовленный каркас и крепят к нему. В натянутом состоянии материал оболочки обычно очень чувствителен к ветровому воздействию, так как при скорости ветра даже 4—5 м/с может возникнуть достаточно большой отсос, чтобы сорвать оболочку с каркаса или даже поднять ее вместе с ним. С этими трудностями столкнулись многие монтажники.

Тентовое покрытие уникальной финской модели полуциркулярной формы образовано деревянными клееными арками, расставленными через 1,5—3 м. Оболочка состоит из полотен шириной, соответствующей шагу арок. Их крепят винтами прямо к аркам, а затем обшивают фанерным уплотнительным поясом в швах. Это надежный, но очень трудоемкий метод монтажа.

Не оправдали себя плоские с уклоном 10—15° каркасно-тканевые покрытия в комбинации с высокорасположенным вытянутым коньком крыши. На покрытии образуются мешки, которые во время оттепели наполняются оттаявшей водой. В некоторых случаях эти мешки могут наполняться большими объемами воды и льда, и тогда состояние покрытия становится угрожаемым.

Из тентовых конструкций, которые разрабатывает фирма «Рукка», нашли промышленное применение покрытия круговых планов. Покрытие имеет форму конуса с двойной оболочкой (рис. 22). Кривизна поверхности оболочки в радиальном направлении постоянна и определяется дугой окружности, радиус которой зависит от соотношения между высотой центра покрытия и основанием. Опорная кромка покрытия укрепляется обычно на дорожке, окружающей бассейн, и ткань натягивается при подъеме внутренней центральной мачты. В середине покрытия, где натяжение ткани повышается, используется несколько слоев ткани — от 4 до 6. Если покрытие поддерживается стальными тросами, то центральная его часть может быть однослойной.

В одном из таких покрытий периметр с помощью стальных тросов крепится к металлическим трубчатым рамам. Ткань натяга-

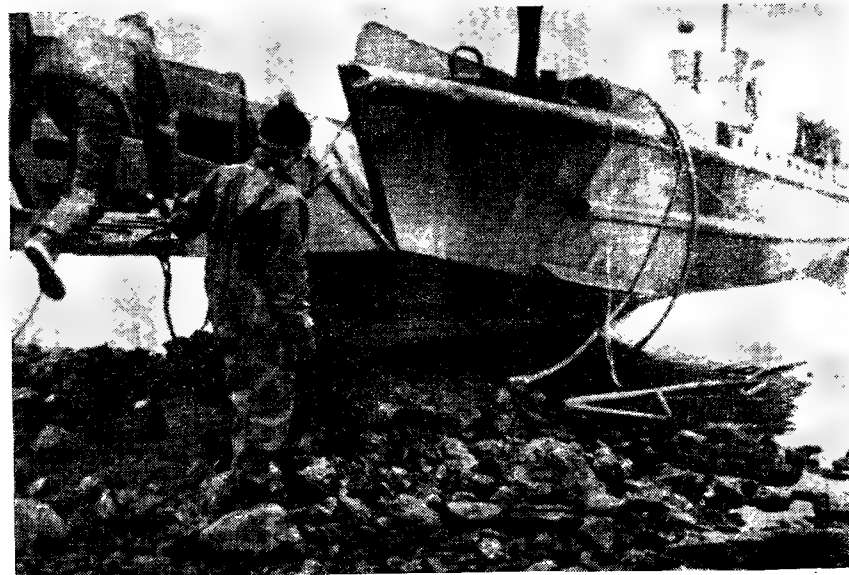


Рис. 21. Спуск на воду судна по мешкам, наполненным водой

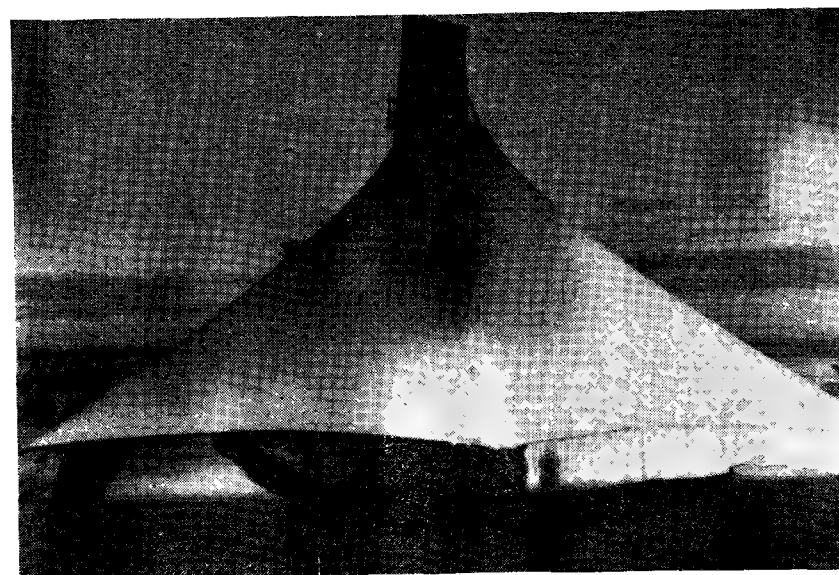


Рис. 22. Коническое тентовое защитное покрытие шахты диаметром 30 м



Рис. 23. Тентовое покрытие кинозала в Таммерфорсе размером 16×8 м

ется центральной мачтой. Правда, в этом случае покрытие может прогнуться под тяжестью дождевой воды. Преимуществами такого типа покрытий являются небольшой вес и недорогой монтаж.

Для летних театров и прочих сезонных сооружений возводят седловидные тентовые покрытия. Точки крепления располагают в местах изгиба, и эти швы подкрепляют поясами из полиэфирного волокна.

Весной 1980 г. была изготовлена новая пневматическая конструкция для городского парка. Это был первый в Финляндии кинозал для показа стереофильма по системе «Синема 180» (рис. 23). Система создает для зрителя иллюзию эффекта присутствия в центре событий. Воздухонепроницаемая ткань оболочки с внутренней стороны имеет черный цвет. Сферический экран изгибается на 180° и напрягается благодаря разнице давлений между тканями экрана и оболочки. Конструкция рассчитана на нагрузку от слоя снега толщиной 180 см и скорость ветра 35 м/с.

Виды повреждений пневматических конструкций. Возможны следующие повреждения воздухоопорных зданий: умышленные; непреднамеренные; вызванные метеорологическими явлениями; возникшие из-за брака в конструкции или материале.

1. В Финляндии некоторые воздухоопорные здания развлекательного назначения (спортивные залы и выставочные павильоны) пострадали от хулиганских выходок. И все-таки случаев хулиган-

ства наблюдалось меньше, чем можно было ожидать. В течение двадцати лет практики эксплуатации надувные конструкции были умышленно повреждены около десяти раз.

2. Непреднамеренные повреждения обычно связаны со снегоуборочными работами вблизи оболочки. Подобные случаи происходят почти каждую зиму, когда бывают снежные заносы. Кроме того, оболочка может быть повреждена неосторожными маневрами регулировщиков вентиляторных установок. При высоком давлении воздуха оболочка может разорваться. Повреждения ее могут быть связаны также с поломкой замков, дверей и т. п.

3. Причиной повреждений могут также быть тяжелые метеорологические условия и недостаточно внимательный уход. Практика показала, что 70—80 % всех повреждений этого типа происходят в субботние и воскресные дни. Собирается недопустимо большое количество снега на покрытиях, которое может повредить дверные устройства. Несмотря на то, что фирма «Рукка» снабжает свои сооружения так называемым снежным канатом, скользящим по оболочке, в конце недели этот канат не справляется со снежными наносами.

Одно из воздухоопорных зданий размером $115 \times 30 \times 11$ м было основательно повреждено во время снежной бури. На оболочке накопилось много снега, избыток которого повредил осветительную арматуру. Следует отметить, что это здание не было оснащено арматурой фирмы «Рукка». Через неделю на месте поврежденной была смонтирована новая оболочка.

Часто повреждения возникают, когда в помещении сильно поднимается давление воздуха. От большой разницы внешнего и внутреннего давлений страдает материал оболочки. Был случай, когда на оболочку с соседнего здания слетела кровля и порвала ее.

В двух случаях ветер повредил анкерные устройства в районе дверей. В первом случае они были неправильно закреплены, а во втором анкеры были повреждены коррозией. В десяти случаях сооружения получили повреждения потому, что не были оснащены резервными генераторами энергии, так как источник тока, на который всецело полагался владелец, вышел из строя в связи с ураганом.

Сооружение, которое не было снабжено резервным генератором, примерно в течение 20 мин сопротивлялось ветру со скоростью 25 м/с. В некоторых местах анкерные крепления погнулись, и оболочка приподнялась на 10—15 см над землей с подветренной стороны.

4. Из-за производственного брака одно из сооружений было отремонтировано за счет фирмы. Причиной повреждения была неточность раскроя, из-за чего материал разорвался. Другую оболочку отремонтировали за счет фирмы в связи с тем, что в прослойках ткани также был допущен производственный брак.

Одна из финских фирм, поставляющих материал оболочек, допускала 50 % брака. Под влиянием солнечного нагрева сварные швы расходились через 1—3 года после начала эксплуатации обо-

лочек. Справедливости ради следует отметить, что все другие поставщики обеспечивали фирму «Рукка» высококачественными полуфабрикатами.

Несмотря на широкую сферу использования пневматических сооружений в Финляндии, их возможности далеко еще не исчерпаны. Без особого труда можно убедиться в том, что применение этих конструкций имеет много преимуществ. Каждое крупное стационарное спортивное сооружение обходится в десятки миллионов марок, в то время как пневматическое сооружение такой же площади обходится в 5—6 раз дешевле, и его можно установить в любом месте.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В СССР

С. Б. Вознесенский (СССР)

Развитие пневматических конструкций в СССР можно разделить на три периода:

начальный период (1959—1970 гг.);

период подготовки выпуска серийных ВПС — воздухоопорных пневматических сооружений (1970—1975 гг.);

период серийного выпуска ВПС (после 1975 г.).

В табл. 1 представлены сведения о ряде пневматических сооружений начального периода их освоения и развития, а также о разработчиках проектов и предприятиях, привлеченных для их изготовления. В некоторых случаях разработчики сами делали экспериментальные образцы (местное изготовление).

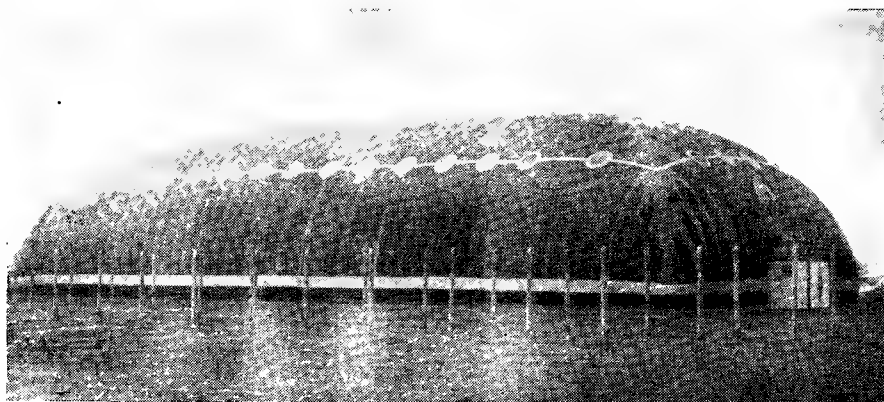


Рис. 1. Воздухоопорный склад ВС-1 во Львове

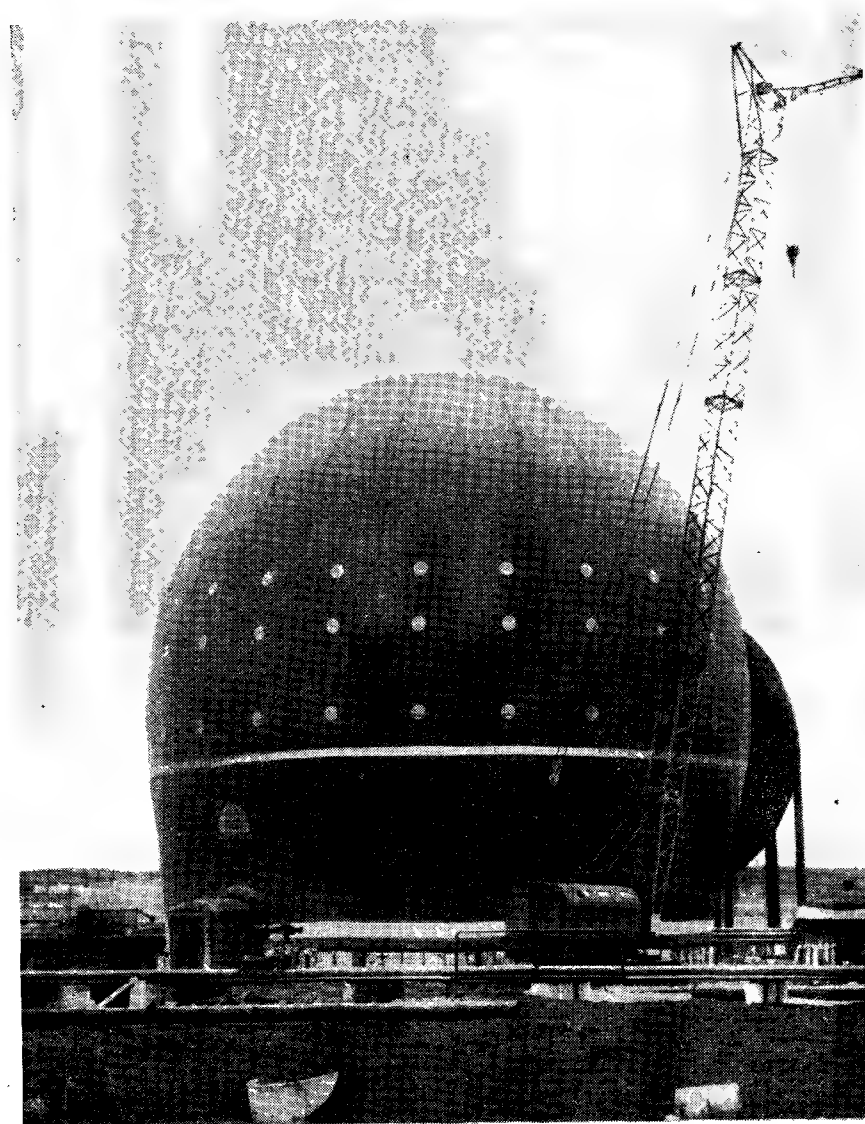


Рис. 2. Укрытие стальных шаровых газгольдеров при производстве сварочных работ

Одновременно проводились исследования материалов мягких оболочек (табл. 2). Силовой основой служили ткани из волокон — хлопчатобумажного, капронового (как правило) или же их комбинации (полукапрона). Для покрытия в основном использовались синтетические каучуки, реже — поливинилхлорид (ПВХ). Несколько

Таблица 1. Основные пневматические сооружения

Год монтажа	Место монтажа	Сооружения	Тип оболочки	Размеры, м: длина×высота× ширина или — диаметр, h—высота
1959	—	Воздухоопор- ные: эксперимен- тальное	Сф.	Ø 36
1960	Москва	зернохранили- ще на 500 т	Кон.	Ø 20,5, h=9
1961	Москва	экспонат вы- ставки	Цил.	12×7×4,5
1963	Ярославль	зернохранили- ще на 1800 т	»	45×24×7,2
1965—1967	Подмосковье, Тюмень	многоцелевое	»	12×9×4,5
1967	Львов	склад (рис. 1)	»	45×18×9
1968	Нижекамск	укрытие для сварочных ра- бот (рис. 2)	Сф.	Ø 26, h=23
1969	Липецк	склад (рис. 3)	Цил.	45×18×9
1970	Сыктывкар	тепляк для кро- вельных ра- бот	»	56,7×11,5× ×4,25
1970	Москва	выставочный павильон	Сф.	Ø 12, h=9
1967	Львов	Воздухонесо- мые: цех упаковки	Ар.	40×8×4,5
1968	Загорск	склад	»	20×12×6,5
1969	Украина	кинотеатр (рис. 4)	»	14×12×7
1971	Истра	животновод- ческое поме- щение	Паи.	67,5×12×6

Примечание. Сф. — сферическая оболочка; Цил. — цилиндрическая оболочка; Кон. — коническая оболочка; Ар. — пневмоарочная конструкция; Паи. — пневмопанельная конструкция; СК — синтетический каучук; ПИБ — полиизобутилен; НИИРП — Научно-исследовательский институт резиновой промышленности; Уф. з-д РТИ — Уфимский завод резинотехнических изделий;

начального периода (1959—1970 гг.)

Материал оболочки		Исполнители		Ссылка на источник
шифр	основа покрытие	проект	изготовление	
19	Капрон СК	—	НИИРП	[1]
500	хлопчатобу- мажный мнткаль СК	Промзернопроект, ЦНИИСК	Яр. з-д РТИ	[2]
500	То же	—	Местное	[1]
806	Капрон 1528 Бутил-каучук	Промзернопроект, ЦНИИСК	Яр. з-д РТИ	[3]
—	Полиамидная пленка	ВНИИСТ	ВНИИСТ	[4]
51-019	См. табл. 2	НИИРП	НИИРП	[5]
51-019	То же	НИИРП, ВНИИМонтаж- спецстрой	НИИРП	[3]
51-019	»	ВНИИМонтаж- спецстрой	НИИРП	[5]
—	Полукапрон ПВХ	ЦНИИСК	Местное	[6]
51-060	См. табл. 2	НИИРП	НИИРП	[5]
—	—	НИИРП	НИИРП	[5]
109ф и ПК-4	Капрон Наирит и СКБ+ПИБ	НИИРП	НИИРП	[5]
109ф и ПК-4	То же	НИИРП	НИИРП	[5]
—	—	Уф. з-д РТИ	Уф. з-д РТИ	[7]

лочка; Кон. — коническая оболочка; Ар. — пневмоарочная конструкция; Паи. — пневмопанельная конструкция; СК — синтетический каучук; ПИБ — полиизобутилен; ЦНИИСК — Центральный научно-исследовательский институт строительных материалов; ВНИИСТ — Всесоюзный научно-исследовательский институт строительных материалов; Уф. з-д РТИ — Уфимский завод резинотехнических изделий.

Таблица 2. Основные характеристики материалов для оболочек

Шифр материала	№ технических условий	Артикул ткани	Вид покрытия	Цвет покрытия		Минимальная температура эксплуатации ВЛС, °С	Толщина, мм	Масса, кг/м²
				наружного	внутреннего			
51-019	38-5-3-86-9	Капрон параллельно дублированный 56026	Натрий-бутадиновый каучук с полиизобутиленом	Темно-серый	Светло-серый	-50	0,7	0,65
У-92	105 659-74	То же	То же	Светло-серый	»	-50	0,7	0,70
У-93	105 659-74	Капрон 56026	»	»	»	-50	0,5	0,34
23-М	МРТУ 38-5-60-42-65	Капрон параллельно дублированный 56026	Наирит	Темно-серый	Светло-коричневый	-40	0,7	0,55
А-01	ТР 51-50080	Капрон ТК-80Р0	»	Светло-серый	»	-35	1,0	0,80
СПАМ-60*	17-21-340-80	Лавсан ТЛ-60	Полivinилхлорид	Различный	Различный	-40	0,7	0,70

* Строительный пленочный армированный материал.

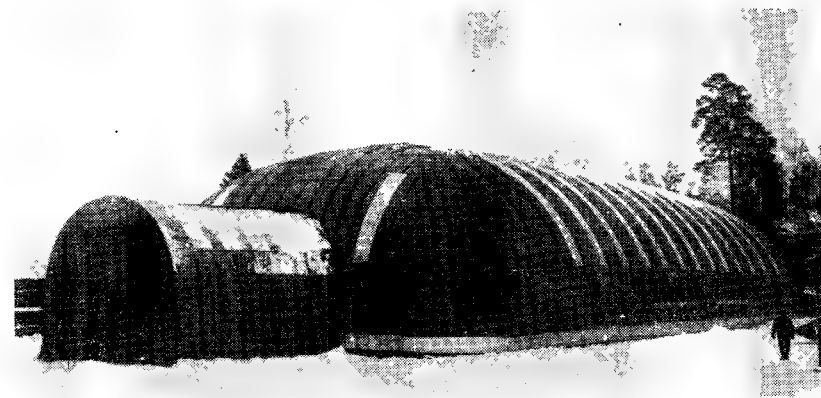


Рис. 3. Воздухоопорный склад ВС-2 в Липецке



Рис. 4. Широкоэкранный кинотеатр в Киеве

ко экспериментальных воздухоопорных сооружений было изготовлено из неармированной полиамидной пленки.

Сооружения этого периода, которые можно назвать экспериментальными, послужили для накопления опыта, использованного при дальнейшем развитии пневматических конструкций.

Основное внимание уделялось сооружениям воздухоопорного типа. Воздухонесомые сооружения с пневмоарочным каркасом и тентовым покрытием и пневмопанельные сооружения появились позже. Трубчатые арки делали либо из полотнищ с клеено-шитыми швами с диаметром сечения 450 мм при рабочем давлении воздуха 70—100 кПа, либо из цельнотканых капроновых рукавов с воздухонепроницаемыми камерами.

Одним из примеров пневмоарочных конструкций является передвижной кинотеатр на 200 мест с широким экраном, который в течение ряда лет обслуживал села Украины (см. рис. 4).

Для начального периода развития ВПС характерны обширная область применения этих сооружений и проверка их в различных климатических зонах страны. Опыт начального периода освоения пневматических строительных конструкций, накопленный рядом организаций, позволил сделать выводы об эффективности ВПС, возможности применения их в различных областях народного хозяйства страны, строительстве специализированных предприятий по производству ВПС, необходимости выявления потребности в ВПС различных отраслей промышленности, сельского хозяйства, промышленного и гражданского строительства.

Лаборатория пневматических конструкций ЦНИИСК, являясь головной организацией этого направления в системе Госстроя СССР, координировала выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для нужд строительства. В частности, ею была выявлена потребность страны в пневматических сооружениях, определены область применения и номенклатура ВПС, что было необходимо для планирующих органов при подготовке решения о серийном производстве ВПС.

Решающую роль в начальном и последующих периодах развития пневматических конструкций сыграл Загорский филиал НИИ резиновой промышленности, взявший на себя разработку материалов, конструкций и технологии изготовления многих оригинальных сооружений.

Проектированием, разработкой и испытаниями ряда уникальных пневматических сооружений успешно занимался ВНИИмонтажспецстрой.

Период 1970—1975 гг. характеризовался углубленным изучением комплекса вопросов, возникавших в связи с подготовкой к серийному производству пневматических конструкций. ЦНИИСК провел ряд натурных испытаний воздухоопорных сооружений отечественного и зарубежного изготовления.

Одним из таких объектов явился склад сахарной свеклы в г. Яготине Киевской области [8]. В оболочке размером 24×48 м (рис. 5) в зимний период хранилось 1500 т сахарной свеклы. Минимальная температура окружающей среды достигала -30°C при скорости ветра до 25 м/с. В пневматическом сооружении за весь период хранения свеклы поддерживалась заданная температура от 0 до 2°C (рис. 6, 7).

В 1973 г. в Магадане было смонтировано воздухоопорное сооружение, которое использовалось в качестве мастерской [9]. Пролет оболочки 16 м, длина 60 м, высота 8 м, размер шлюза 14×4×5 м. Оболочка выполнена из дублированной капроновой ткани с каучуковым покрытием (шифр У-92). Обогрев воздуха под оболочкой обеспечивался двумя теплогенераторами ТГ-150. Монтаж оболочки выполняла бригада из пяти человек. Общие трудозатраты на ус-

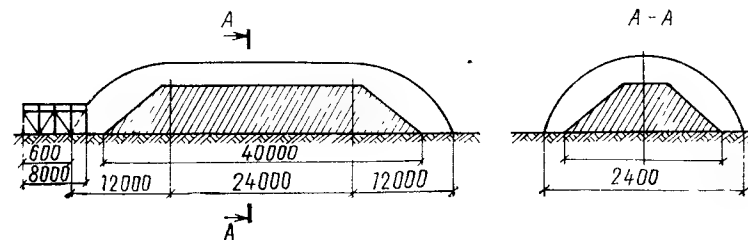


Рис. 5. Склад для хранения свеклы. Схема вентилирования, обогрева и размещения измерительных приборов

1 — вентилятор МЦ-8; 2 — подземная часть вентиляционных воздуховодов; 3 — магистральный воздухопровод; 4 — кран, регулирующий подачу воды; 5 — металлическая решетка; 6 — теплогенератор ТГ-150; 7 — трубопровод для подачи теплого воздуха под оболочку; 8 — деревянная заслонка, перекрывающая подачу воздуха в кагат; 9 — электрокалорифер; 10 — кагатные термометры; 11 — дистанционные термометры системы ЦБС-ДКТ; 12 — недельный гигрограф; 13 — недельный термограф; 14 — суточный термограф

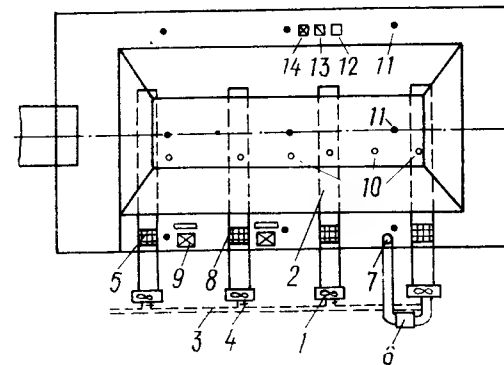


Рис. 6. Температура наружного воздуха (сплошные линии), воздуха под пневматической оболочкой (пунктирные линии) и свеклы в опытных (штриховые линии) и контрольном (штрихпунктирные линии) кагатах

тановку оболочки, без земляных работ и сооружения фундаментов, составили 1208 чел.-ч, или 1,26 чел.-ч на 1 м² площади пола.

До организации серийного производства воздухоопорных зданий они в небольшом количестве приобретались за рубежом, например в ГДР (предприятие в Нойгерсдорфе), в Финляндии (фирма «Рукка»), в Швеции (фирма «Барракуда»), в Норвегии (фирма «Сканховер»), в США (фирма «Сидэйр») и др. Некоторые из них были испытаны в тяжелых климатических условиях Крайнего Севера.

В период 1972—1973 гг. на севере Красноярского края и в Магаданской области было смонтировано несколько ВПС норвежской фирмы «Сканховер» [9]. Пролет оболочки 20 м, длина 75 м, высота 8 м. В одном из торцов оболочки имелся въездной шлюз размером 8×4×3 м и входной размером 2×2×2 м. В другом торце находился блок воздухоподушек и отопительных установок и аварийного генератора, состоящий из четырех стальных контейнеров размером 2,1×3,3×1,6 м. Оболочки изготовлены из белой и оранжевой ткани типа «тревра» с двусторонним покрытием из поливинилхлорида.

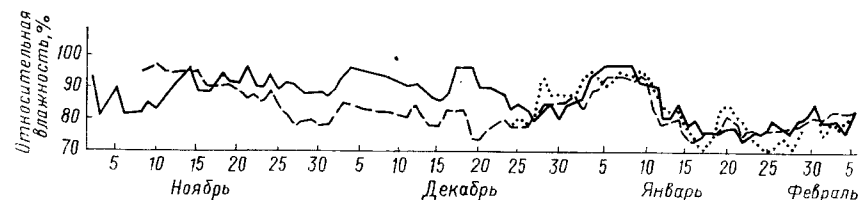


Рис. 7. Относительная влажность наружного воздуха (сплошные линии), воздуха под пневматической оболочкой (штриховые линии) и в межкорлевом пространстве (пунктирные линии)

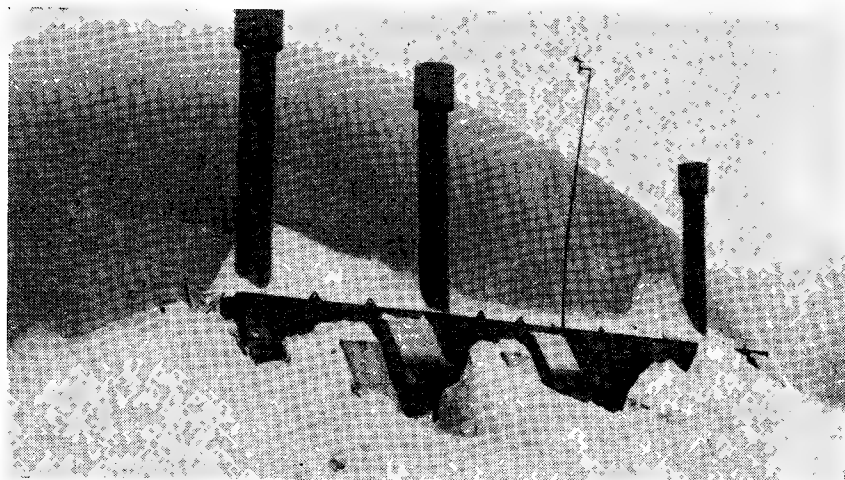


Рис. 8. Пример эксплуатации ВПС фирмы «Сканховер» в условиях Таймыра

Районы установки оболочек отличаются суровыми климатическими условиями: морозы достигают -56°C , а скорость ветра доходит до 40 м/с при сильных снегопадах. Районы были выбраны специально с целью проверки работы оболочек в тяжелых климатических условиях и разработки ВПС особой конструкции, пригодных для районов Крайнего Севера.

В результате наблюдений было установлено следующее: на кровле блока башенного отделения образуются снеговые мешки (рис. 8), которые деформируют экраны машинного отделения;

при подаче воздуха происходит засасывание снега под оболочку; снег концентрируется внутри оболочки в районе машинного отделения, и для его вывоза приходится применять автотранспорт;

система питания отопительных установок и система автоматики сложны и требуют квалифицированного обслуживания, что в условиях сильных морозов, снегопадов и ветра чрезвычайно затруднительно;

в узлах крепления тканевой оболочки к блоку машинного отделения и входному шлюзу возникают разрывы ткани;

разворот транспортных средств под оболочкой затруднителен и требует дополнительной площади, поэтому необходим второй въездной шлюз.

Материалы по обследованию ВПС фирмы «Сканховер» были использованы при проектировании отечественных оболочек.

К этому же периоду (1974 г.) относится создание купольного укрытия для выполнения сварочных работ, запроектированного ВНИИмонтажспецстроем в г. Новомосковске (рис. 9). Для специальных сталей свариваемых резервуаров требовались особые технологические условия сварки — положительная температура и влажность не более 80 % при надежной защите от снега, дождя и ветра.

Воздухоопорное пневматическое укрытие диаметром 34 м и высотой 17 м было разработано ВНИИмонтажспецстроем и изготовлено на Уфимском заводе резинотехнических изделий. Монтаж оболочки выполняли с помощью башенного крана, поднявшего укрытие на отметку 42 м. Воздухоопорный купол закреплялся на стенках резервуара. Монтаж оболочки длился один день, а наполнение воздухом 20 мин. Подобные оболочки под действием ветра испытывают большие перемещения, которые можно сократить путем резкого повышения давления воздуха. Однако по ряду причин это нежелательно, в связи с чем в 1976 г. была изготовлена воздухоопорная оболочка с пневматическими торообразными кольцами жесткости (рис. 10). Давление воздуха в кольцах жесткости может достигать 5 кПа при давлении под оболочкой до 0,4 кПа. Натурная проверка оболочки показала целесообразность ее конструкции — пневматические кольца резко повышают жесткость оболочки и упрощают монтаж сооружения [3].

По плану девятой пятилетки в г. Ангрене (УзССР) был построен завод «Резинотехника», который с 1975 г. начал серийный вы-



Рис. 9. Применение пневматического укрытия для сварки резервуара в Новомосковске

пуск воздухоопорных пневматических сооружений для народного хозяйства страны [10, 11].

Основным изделием завода является воздухоопорное сооружение А-18Ц (Ангрен, пролет 18 м, цилиндрическая оболочка), показанное на рис. 11 и 12. Пролет 18 м был выбран как наиболее универсальный, установленный при анализе потребности в ВПС.



Рис. 10. Оболочка с кольцами жесткости

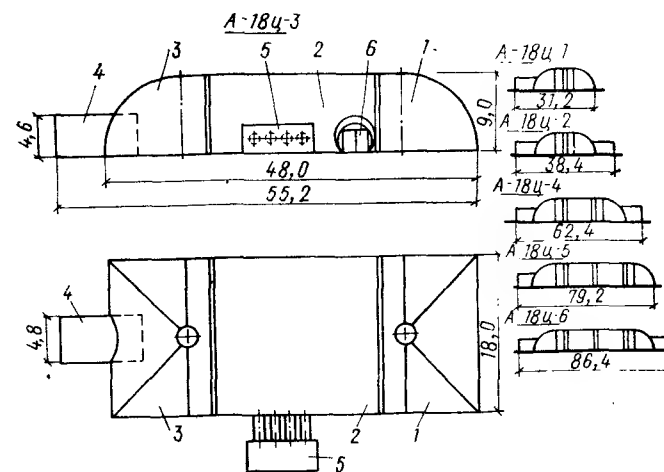


Рис. 11. Унифицированное воздухоопорное сооружение А-18Ц

1, 3 — торцевые монтажные секции; 2 — рядовая секция; 4 — транспортный шлюз; 5 — машинное отделение; 6 — пожарный выход

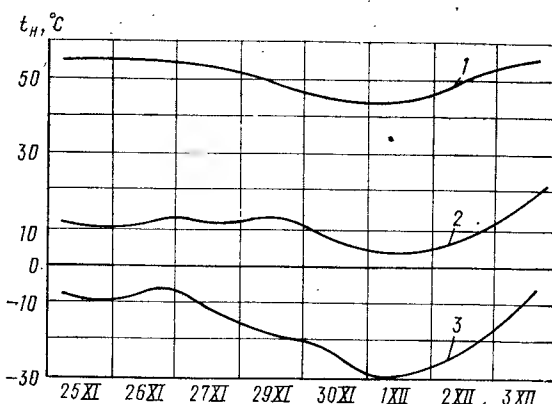
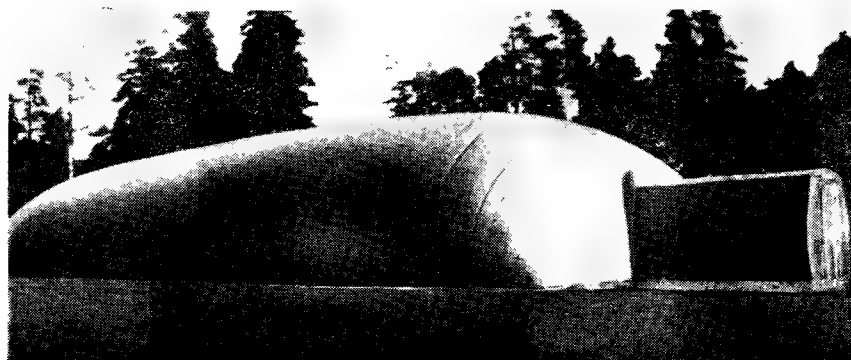


Рис. 12. Общий вид ВПС А-18Ц

Рис. 13. Зависимость среднесуточных значений температуры внутри пневматической оболочки от наружной температуры t_n
1 — температура на выходе теплогенератора; 2 и 3 — температура соответственно внутри и снаружи пневмо-оболочки

Комплект сооружения состоит из оболочки, изготавливаемой из тканепленочного материала А-01 (капроновая ткань ТК-80-РО, покрытие на основе синтетического каучука «наирит»), транспортного и входного шлюзов, трех воздухоподающих установок со стандартными центробежными вентиляторами Ц4-70 № 5, двух теплогенераторов ТГ-2,5 мощностью 290 кВт и системы автоматики. В качестве резервного источника тока используется дизель-генератор мощностью 12 кВт.

Технические характеристики ВПС А-18Ц

Габаритные размеры оболочки, м	18×48×9
Полезная площадь, м ²	864
Объем оболочки, м ³	6000
Масса тканевой части, т	1,7
Масса каркаса шлюза, т	2,2
Рабочее давление, Па	150
Максимальное давление, Па	400

Как показал опыт эксплуатации сооружений А-18Ц, особое значение они приобретают для северных и отдаленных районов. С 1976 г. эти сооружения широко применяются в системе Миннефтегазстрой

(фирма «Сиборггазстрой» на севере Тюменской области). В течение ряда лет фирма проводила исследования различных вариантов пневматических сооружений для внедрения в данном районе. Особое внимание уделялось фундаментам, так как промерзание грунтов достигает 3 м. Ввиду короткого летнего периода был рассмотрен вариант зимнего монтажа сооружений. Опыт эксплуатации ВПС в Тюменской области показал, что их целесообразно применять в качестве стоянок транспортных средств, ремонтных и сборочных мастерских, складов и спортивных сооружений. В течение двух лет в Среднем Приобье и на севере Тюменской области было смонтировано около десяти сооружений.

При натурной проверке первых сооружений особое внимание уделялось изучению температурно-влажностного режима в помещении [12], в частности, зависимости среднесуточной температуры внутри помещения от наружной температуры (рис. 13).

Интересным примером применения ВПС явилось сооружение, составленное из двух оболочек А-18Ц длиной 72 м. Под оболочкой проводили сборку вышек буровых установок.

В настоящее время в номенклатуру ангренского завода «Резинотехника» входит ряд ВПС, которые выпускаются серийно или готовятся к выпуску (табл. 3).

Таблица 3. Характеристика ВПС, выпускаемых Ангренским заводом «Резинотехника»

Размеры оболочки ¹ , м, ширина×высота×длина или диаметр×высота	Примечание
Цилиндрические оболочки	
12×6×24	С поперечным раскроем торцов
12×6×24	С торцами из трех элементов
18×9×48	—
18×9×48	С теплозащитным экраном
24×9×48	С торцами из трех элементов
24×9×48	С теплозащитным экраном
30×12×60	
Сферические оболочки	
18×9	—
24×9	—
30×9	—

¹ По требованию заказчика оболочку можно удлинить на величину, кратную 6 м. Оболочки пролетом более 30 м выпускаются по индивидуальным заказам.

В период подготовки серийного выпуска ВПС был проведен ряд огневых испытаний воздухоопорных оболочек. Основной целью испытаний, проведенных ЭКБ по железобетону Миннефтегазстрой СССР, явилось получение сведений для оценки времени и возможности пребывания человека в пневматическом сооружении в пери-

од эвакуации и ликвидации пожара и анализ поведения сооружения при горении материала применительно к сооружениям следующего назначения: трубосварочные базы, электромеханические, санитарно-технические, ремонтно-механические, арматурные мастерские и столовые-раздаточные.

Испытывалась оболочка размером $9 \times 18 \times 4,5$ м, выполненная из обрезиненного капронового материала. В процессе испытаний изучали температурный режим внутри сооружения, характер задымления, состав и содержание продуктов сгорания, изменение давления внутри сооружения.

Детальный анализ тепловых нагрузок и проведенные огневые испытания позволили рекомендовать ВПС для временных складов промышленной и сельскохозяйственной продукции, минеральных удобрений, строительных материалов, укрытий стоянок автотранспорта, ремонтно-механических мастерских, участков строительно-монтажных работ, участков сварочных и изоляционных работ на магистральных трубопроводах, трубосварочных баз, площадок буровых работ, мастерских по изготовлению металлоконструкций, укрытий скота в полевых условиях, спортивных сооружений. Оболочки ВПС отнесены к зданиям V степени огнестойкости.

Накопленный опыт проектирования, изготовления и эксплуатации ВПС позволил разработать и узаконить единый для всех ведомств нормативный документ СН 497-77 [13]

Анализ стоимости воздухоопорных сооружений отечественного и зарубежного производства показывает следующее соотношение цен между отдельными частями сооружения (за 100 % принята общая стоимость комплекта сооружения):

Оболочка	55—70%
Вентиляторные установки	2—4%
Отопительные установки	10—12%
Аварийный генератор	5—8%
Шлюзы	5—11%
Электрооборудование	2—3%
Автоматика	2—3%

Стоимость фундаментов колеблется в пределах 8—12 % стоимости комплекта сооружения в зависимости от его назначения и срока службы, стоимость пола — в пределах 10—12 %. Затраты на монтаж незначительны и существенно не сказываются на стоимости сооружения.

При правильной эксплуатации неотапливаемого воздухоопорного сооружения эксплуатационные расходы невелики. В отапливаемых же сооружениях значительную сумму составляют расходы на отопление, особенно при использовании жидкого топлива. Поэтому в настоящее время уделяется большое внимание улучшению теплозащитных свойств тканевых оболочек.

Широкое внедрение пневматических сооружений в значительной степени сдерживается их высокой стоимостью, которую определяет стоимость мягкой оболочки.

Лабораторией пневматических конструкций ЦНИИСК был проведен анализ стоимости воздухоопорных пневматических конструкций, изготовленных индивидуально и серийно на ряде предприятий — на заводах и в мастерских. Как следует из сопоставления калькуляций, значительную долю отпускной стоимости воздухоопорных оболочек составляет материал. В качестве примера ценообразования материала А-01, из которого изготавливаются ВПС А-18Ц, приведена калькуляция ангреноского завода (руб/м² материала):

Покупная цена ткани	1—93
Транспортные расходы	0—48
Резиновая смесь	2—19
Заработная плата	0—49
Содержание оборудования	0—42
Цеховые расходы	0—70
Общезаводские расходы	0—51
Прочие расходы	0—01

6—73

Прибыль 12 %	0—81
Отпускная стоимость	7—54

В табл. 4 дается сопоставление калькуляций на изготовление оболочек на ряде предприятий. Как видно из этой таблицы, значительную долю себестоимости изделий составляют цеховые и общезаводские расходы, которые на крупных заводах значительно выше, чем в мастерских. Существенно сказываются на отпускной стоимости изделий и расходы по содержанию и эксплуатации оборудования.

Проведенный анализ ценообразования позволил прогнозировать перспективную стоимость тканевых оболочек, снижаемую за счет уменьшения стоимости материалов, совершенствования конструкции оболочек и технологии их изготовления, а также сокращения накладных расходов и расходов на содержание и эксплуатацию оборудования. Совершенствование конструкции оболочек позволит снизить трудозатраты на их изготовление на 20—30 %, а совершенствование технологических операций — на 10—20 %.

Анализ эксплуатационных затрат показал, что годовой расход на электроэнергию при мощности вентиляторных установок 6—8 кВт не превышает 1—1,4 тыс. руб. Если учесть, что оболочки некоторых воздухоопорных сооружений иногда могут быть опущены на длительное время, например, на складах сельскохозяйственной техники, не работающей в зимний период, складах минеральных удобрений, промышленных товаров в упаковке и т. д., то затраты на электроэнергию в таких случаях будут сокращены.

Подобный эксперимент был проведен в одном из подмосковных совхозов. Под оболочку в поздний осенний период было введено более 30 сельскохозяйственных машин и проведены профилакти-

Таблица 4. Сопоставление калькуляций на изготовление оболочки

Показатель	Изготовитель				
	Уфимский завод резино-технических изделий	Златоустовская швейная фабрика	Ангренский завод «Резинотехника»	Загорский филиал НИИРП	Перспективные данные
Размер оболочки в плане, м	16×48	12×65	18×48	18×50	—
Материал оболочки (шифр или название)	51-019	Капроновая ткань с добавкой льна и односторонним покрытием из ПВХ	23-М	51-019	—
Расходы на 1 м ² перекрываемой площади, руб.:					
материалы, основные и вспомогательные	16,4	8,8	15,5	27,2	10,0
зарплата, основная и дополнительная	8,8	2,5	4,7	2,5	2,0
соцстрах	0,8	0,2	0,4	0,2	0,2
расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	—	—	3,4	—	2,5
цеховые расходы	4,0	1,3	4,2	—	2,1
общезаводские расходы	4,0	0,7	3,5	—	1,7
накладные расходы	—	—	—	7,5	—
полная себестоимость	34,0	13,5	31,7	37,4	18,5
прибыль	4,9	1,0	3,7	—	2,4
отпускная цена	40,1	14,5	35,5	37,4	21,0

ческий ремонт и консервация техники в условиях осенней непогоды. По окончании этих работ оболочка была опущена и находилась в таком состоянии до весенних полевых работ. Сельскохозяйственные машины в период осенне-зимней стоянки оказались в полной сохранности [14].

Расходы на отопление зависят от многих факторов: района установки сооружения, назначения (требование микроклимата), стоимости теплоносителя. Например, при расходе дизельного топлива отопительными установками ВПС А-18Ц (два теплогенератора ТГ-2,5) 60 кг/ч средние расходы в отопительный сезон (6 мес.) составят 10—12 тыс. руб. Применение теплозащитных тканепленочных экранов снизит расходы на отопление приблизительно в 2 раза.

С начала 70-х годов ведутся работы по возведению железобетонных оболочек на пневматической опалубке. Одним из первых сооружений явилась цилиндрическая оболочка пролетом 6 и длиной 6 м, выполненная по разработкам ЦНИИСК и Мосграждан-

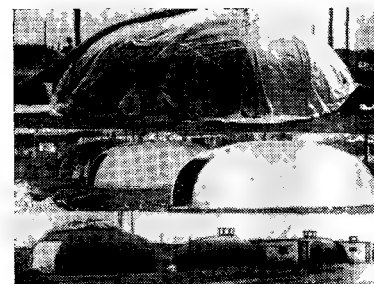


Рис. 14. Этапы возведения купола из лепестковых элементов

проекта [15]. Оболочка возведена методом подъема бетонной массы с поверхности земли.

Одновременно Б. И. Покровским были начаты работы по возведению оболочек различных типов на пневматической опалубке [16]. Например, оболочка купольного типа диаметром 6 м была сооружена из плоских лепестковых элементов.

Летом 1971 г. с помощью пневматической опалубки был построен сводчатый склад пролетом 6 и длиной 7 м. Пневмоопалубка изготовлена Загорским филиалом НИИРП из ткани № 51-019, масса оболочки 150 кг, рабочее давление 1800 Па. Пневматическая опалубка испытывалась на давление 2300 Па. Этапы возведения сооружений приведены на рис. 14 и 15.

Дальнейшим развитием работ по возведению цилиндрических сводов явилось сооружение ряда объектов пролетами 12 и 18 м (рис. 16).

Рибристые своды выполнялись методом подъема бетонной массы с нулевой отметки с помощью пневматической опалубки, изготовленной ангренским заводом «Резинотехника».

Материал опалубки — обрезаемая ткань ТК-80 и ТК-120.

Одновременно с методом подъема бетонной массы с нулевой от-

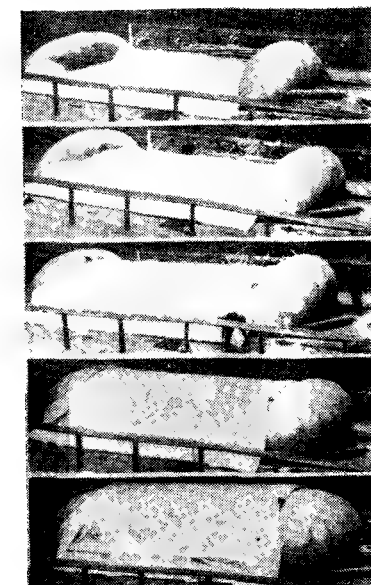
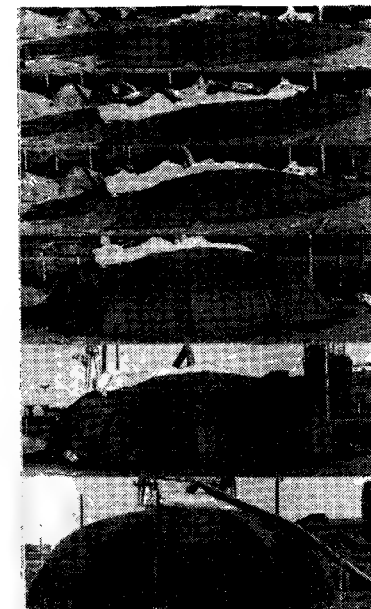


Рис. 15. Этапы возведения сводчатого склада пролетом 6 м

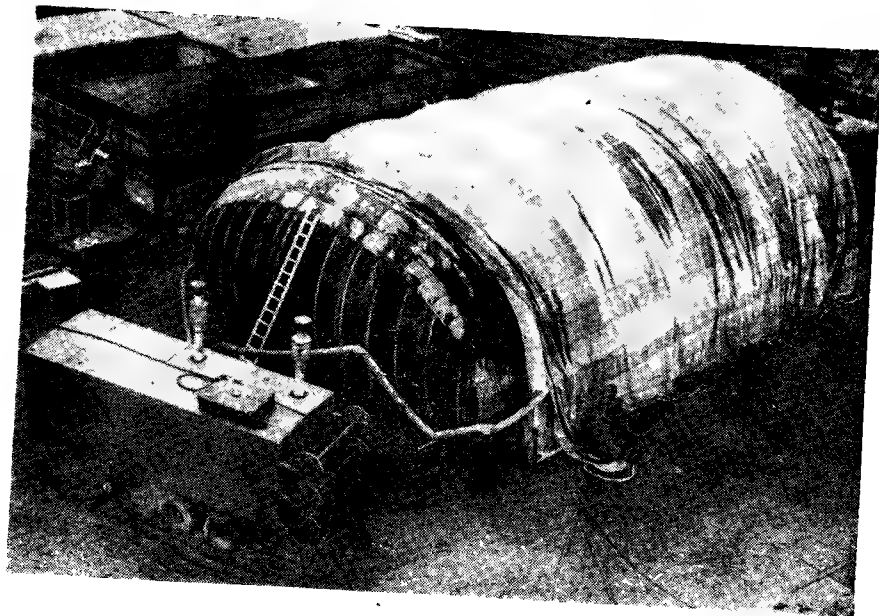


Рис. 16. Возведение ребристого свода пролетом 12 м

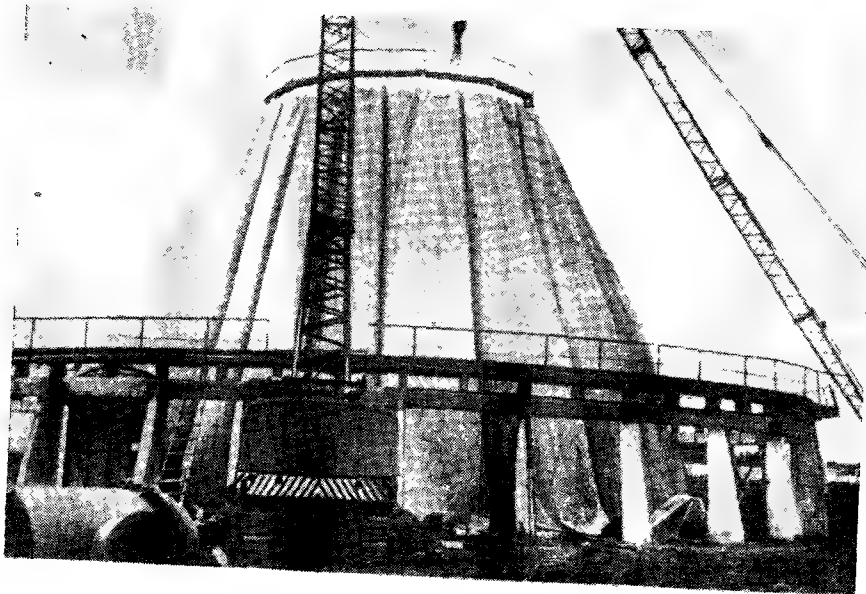


Рис. 17. Этапы возведения купола диаметром 32 м

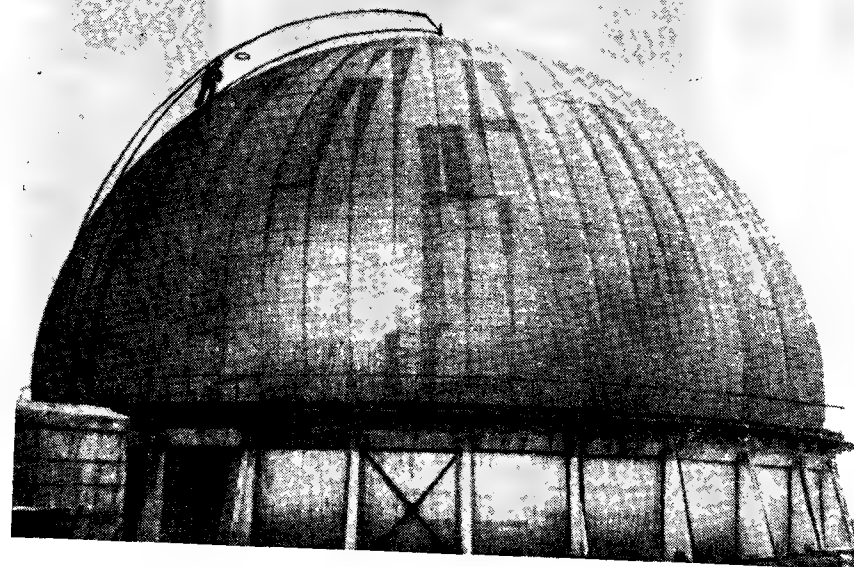


Рис. 17б

метки в отечественной практике развивался и метод торкретирования. Например, под Москвой был сооружен железобетонный купол диаметром 32 и высотой 16 м с цокольной цилиндрической частью [1]. Толщина купола 5—6 см. В качестве арматуры использована проволока диаметром 5,5 мм, расположенная в меридиональном и широтном направлениях с ячейкой около 200 мм. На рис. 17 приведены этапы возведения купола.

Проект сооружения и его возведение выполнены под руководством В. В. Беспалова (Московский архитектурный институт). В настоящее время ведется подготовка к возведению ряда купольных сооружений диаметром 24 и 36 м [17].



Рис. 17в

1. Пневматические конструкции воздухоопорного типа/Под ред. В. В. Ермолова. М., Стройиздат, 1973.
2. Пневматические строительные конструкции/Под ред. А. Б. Губенко. М., Госстройиздат, 1963.
3. Арсеньев Л. Б., Поляков В. П. Пневматические сооружения. М., Знание, 1981.
4. Овсепян А. П. и др. Инвентарные сборно-разборные сооружения из светопрозрачной полимерной пленки.— Промышленное строительство, 1968, № 7.
5. Поляков В. С., Шапов В. П. Пневматические конструкции в строительстве. М., Стройиздат, 1975.
6. Вознесенский С. Б. Пространственные конструкции из тканепленочных материалов.— Промышленное строительство, 1977, № 8.
7. Охотников А. А., Анцыгин Ю. Г. Пневматические сооружения для народного хозяйства.— В сб.: Теория мягких оболочек и их использование в народном хозяйстве. Изд. Ростовского ун-та, Ростов-на-Дону, 1976.
8. Хелемский М. З., Онищенко Н. И., Вознесенский С. Б. и др. Исследования по использованию пневматических конструкций в качестве складов для хранения свеклы.— Сахарная промышленность, 1974, № 5.
9. Вознесенский С. Б., Ермолов В. В. Проектирование пневматических конструкций в СССР и за рубежом. ЦНИИС Госстроя СССР, М., 1975.
10. Искандаров И. Н., Вознесенский С. Б. Склад из пневмоконструкций.— Промышленный транспорт, 1976, № 7.
11. Искандаров И. Н., Вознесенский С. Б. Организация серийного выпуска воздухоопорных сооружений на Ангренском резиновом комбинате.— В сб.: Пятый дальневосточный семинар по мягким оболочкам. Владивосток, 1976.
12. Глебов В. А., Лакота А. М., Каримов Ф. А. Пневмоопорные сооружения на севере Тюменской области.— Строительство трубопроводов, 1978, № 10.
13. Временная инструкция по проектированию, монтажу и эксплуатации воздухоопорных пневматических сооружений. СН 497—77.
14. Вознесенский С. Б., Гуцков В. Е., Жуканова Н. И. Строительство с применением тентовых покрытий складов минеральных удобрений и других объектов. ЦНИИТЭП Госкомсельхозтехники СССР, М., 1979.
15. Козловский С. Ч., Шапиро Д. Л., Вознесенский С. Б., Лернер Е. П. Железобетонная оболочка на пневматической опалубке.— На стройках России, 1976, № 2.
16. Петраков Б. И. Бетонирование конструкций с использованием пневмоопалубки. Л., Стройиздат, 1974.
17. Вознесенский С. Б., Носов В. М., Шапиро Д. Л., Новиков В. А. Железобетонный купол на пневматической опалубке.— Архитектура и строительство Подмосквы, 1982, № 1.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ЧССР

З. Голуб, Л. Штепанек (ЧССР)

Первые пневматические конструкции в ЧССР были изготовлены в 1962 г. из импрегнированного материала, который в то время употреблялся для пошива дождевых плащей. Из этого материала был выполнен небольшой купол диаметром 6 м. Примерно в то же время из хлопчатобумажной парусины была изготовлена пневма-

тическая палатка диаметром 3 м. Обе конструкции тогда привлекли к себе внимание. На основе наблюдений за обеими конструкциями и опыта их эксплуатации, а также данных зарубежной литературы были изготовлены первые натурные пневматические сооружения, которые в то время использовались в качестве складских помещений. Однако вскоре выяснилось, что у них есть ряд серьезных недостатков, в связи с чем они требуют более пристального внимания и серьезного изучения. С этой целью была разработана программа комплексного исследования пневматических конструкций в ЧССР и начались работы по ее реализации. Отдельные результаты исследования проверялись непосредственно на практике как при строительстве новых объектов, так и в процессе ввода этих объектов в эксплуатацию. Таким образом удалось достигнуть более эффективного повышения их качества. Объекты, создаваемые в ЧССР, могли успешно соперничать с конструкциями, которые на основе многолетнего опыта создавались в ряде других стран.

В начале 70-х годов объем исследований пневматических строительных конструкций в ЧССР существенно сократился, и работы в этой области не были доведены до конца. Тем не менее производство самих конструкций прекращено не было и сейчас оно успешно продолжается.

В настоящее время в ЧССР изготавливается два вида пневматических строительных конструкций. Это, в первую очередь, оболочки, поддерживаемые стальными трубчатыми арками пролетом 18,3 м с шагом 9 м. Стальные арки были впоследствии заменены пневматическими, использование которых вызвало ряд затруднений. Сооружения второго типа — воздухоопорные — изготавливают пролетом 18 м и длиной 30; 42 и 54 м, а также пролетом 21 м при длине 33, 45 и 57 м. В 1979 г. был построен прототип воздухоопорного здания пролетом 45 м при длине 75 м, который в г. Карвине эксплуатируется в качестве конно-спортивного манежа.

Основным поставщиком пневматических строительных конструкций в ЧССР является народное предприятие «Технолен» в г. Свитава. «Технолен» — всемирно известное предприятие, изготавливающее туристские палатки. Поэтому именно здесь удалось в кратчайшие сроки освоить производство пневматических строительных конструкций. Предприятие выпускает сто пневматических сооружений в год, которые хорошо зарекомендовали себя всюду, где они используются по назначению и где им обеспечен надлежащий технический уход. Половина из них служит в качестве складских помещений для хранения сырья, незавершенной продукции, готовых изделий, упаковочных материалов и др. Они применяются и при комплектации изделий, в упаковочных цехах и при перевозке. В строительстве эти конструкции используют не только как склады материалов и изделий, но и как укрытия стройплощадок, а также при изготовлении строительных изделий для монтажа пространственных конструкций и т. п.

Примерно 35 % пневматических конструкций применяется в качестве покрытий спортивных сооружений (залы, плавательные



Рис. 1. Общий вид спортзала в Готвальдове

бассейны, теннисные корты, конно-спортивные манежи и т. д.). Более 10 лет используется воздухоопорное здание размером 18×54 м в качестве школьного спортзала в Готвальдове. Оно имеет искусственное освещение и систему обогрева. Со зданием школы этот зал соединяется застекленным коридором (рис. 1 и 2).

В 1971 г. такое же воздухоопорное здание было смонтировано в Братиславе над плавательным бассейном. Зал непосредственно соединяется с раздевальнями, которые построены из кирпича. В зимнее время зал отапливается (рис. 3).

Для монтажа и комплектации пространственных секций по системе «Вариел» в 1978 г. в Праге было введено в эксплуатацию воздухоопорное сооружение тех же размеров, что и предыдущие. Для увеличения высоты помещения в свету оболочка была смонтирована на железобетонном фундаменте. Так же монтировался и входной шлюз.

В Тренчине построено пневмоарочное сооружение пролетом 9 и длиной 30 м, которое служит складом древесных стройматериалов. Сооружение тех же размеров возведено также в Брно и используется зимой при производстве железобетонных изделий. Здесь экономическая эффективность объекта наиболее очевидна. Оба описанных объекта имеют несущую систему в виде пневматических арок, которыми в настоящее время заменяются арки из стальных труб.

Для некоторых других целей было изготовлено несколько специальных сооружений с пневматическим каркасом (рис. 4—6), а также воздухоопорных (рис. 7).

Развитие пневматических строительных конструкций в ЧССР стало возможным благодаря освоению производства высокопрочного полиамидного волокна. Из него можно изготавливать легкие и

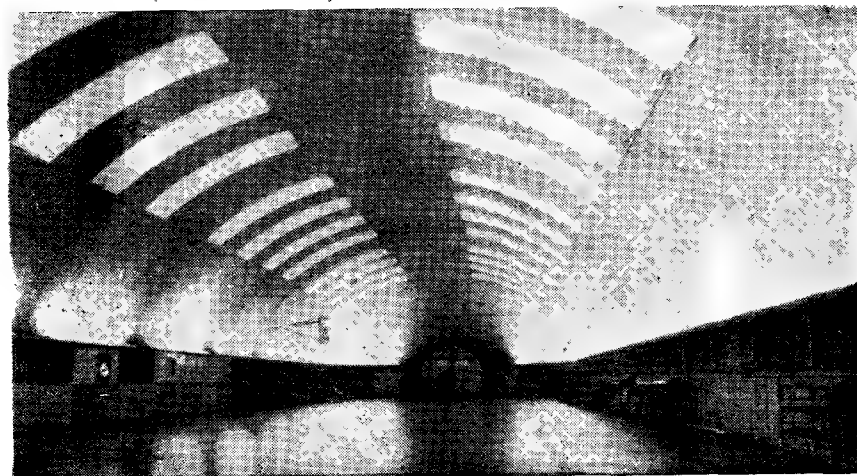


Рис. 2. Интерьер спортзала в Готвальдове



Рис. 3. Интерьер плавательного бассейна в Братиславе

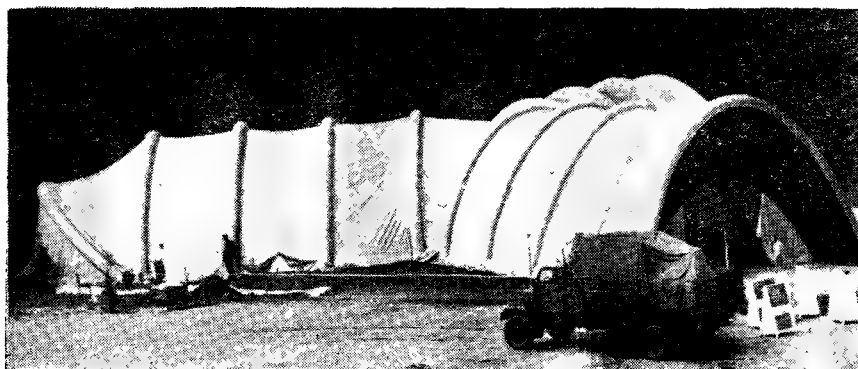


Рис. 4. Общий вид пневмокаркасного сооружения

прочные ткани, которые после покрытия ПВХ служат не только отличным строительно-конструкционным материалом, но могут быть также использованы и в ряде других отраслей. Пока еще не удалось обеспечить в должном объеме производство полиэфирных волокон, которые по своим качествам — прочности и эластичности — в значительной степени превосходят другие материалы.

Сейчас исследованиям и развитию производства текстильных материалов уделяется большое внимание. Работами в этой области занимался Научно-исследовательский институт волокна в г. Шумперке, который достиг немалых результатов. В настоящее время налажен выпуск полиамидных волокон как по отечественной технологии, так и по зарубежной, в частности по японской лицензии. Их производство осуществляет народное предприятие «Хемко Гумене»; производство тканей, как и самих объектов, обеспечивает народное предприятие «Технолен» (см. таблицу). Срок

Показатели двух основных материалов воздухоопорных оболочек (силовая основа — ткань из полиамидного волокна «хемлон», покрытие из ПВХ)

Показатель	Материал	
	12824-550	12823-450
Ширина полотна, см	140±2	140±2
Масса ткани, г/м ²	280±20	215±15
Масса покрытия, г/м ²	550±50	450±50
Масса материала, г/м ²	850±50	650±50
Толщина материала, мм	0,8	0,6
Прочность на разрыв ¹ , кН/5 см	4/4	3/3
Прочность на раздир ¹ , кН	0,7/0,8	0,25/0,20
Адгезия покрытия к основе, Н/см	20	20
Максимальное удлинение при увлажнении, %	2	2
Морозостойкость, °С	—30	—30
Теплостойкость, °С	70	70

¹ Над чертой — по основе, под чертой — по утку.

службы тканей из полиамидного волокна около 10 лет. В течение этого срока они сохраняют прочность при разрыве от 3 до 6,5 кН/5 см.

Экспериментальные испытания первых образцов пневматических строительных конструкций способствовали разработке программы комплексного систематического исследования в этой области. Центром комплексного исследования стал Научно-исследовательский институт при Военной академии в Брно. В решении некоторых проблем, связанных с развитием текстильных материалов, достигли определенных успехов Научно-исследовательский институт волокна в Шумперке, а также изготовитель этих материалов — предприятие «Технолен». Результаты проведенных исследований изложены в ряде работ, все они были опубликованы в специальных журналах, а также представлены на конференциях в ЧССР и за рубежом.

Исследования проводились по трем основным направлениям: конструкционные материалы, воздухоопорные здания, пневмокаркасные конструкции.

Исследование материалов, предназначенных для строительных конструкций нового типа, было направлено на развитие новых видов тканей в соответствии с их назначением. Научно-исследовательскому институту волокна в Шумперке в сотрудничестве с предприятием «Технолен» удалось разработать материалы, которые по

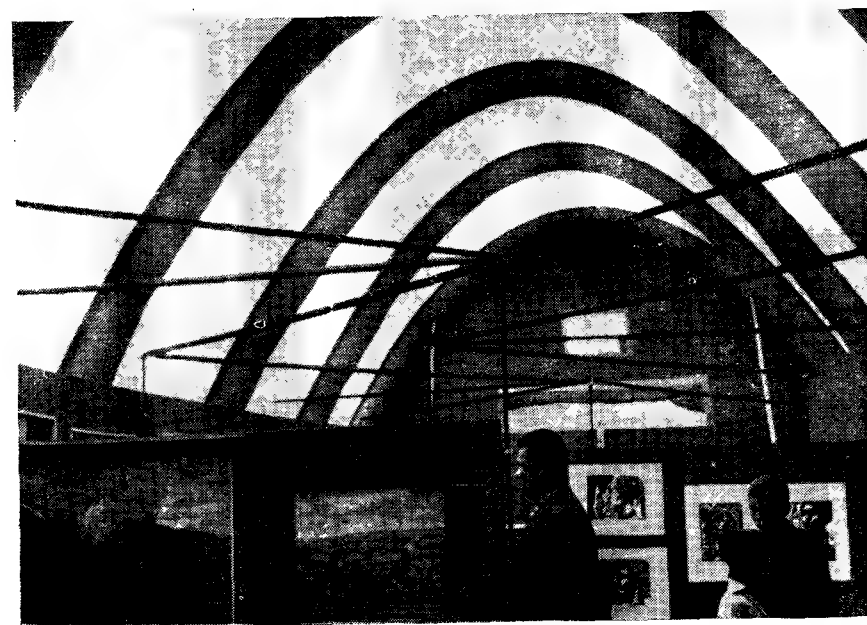


Рис. 5. Интерьер пневмокаркасного сооружения

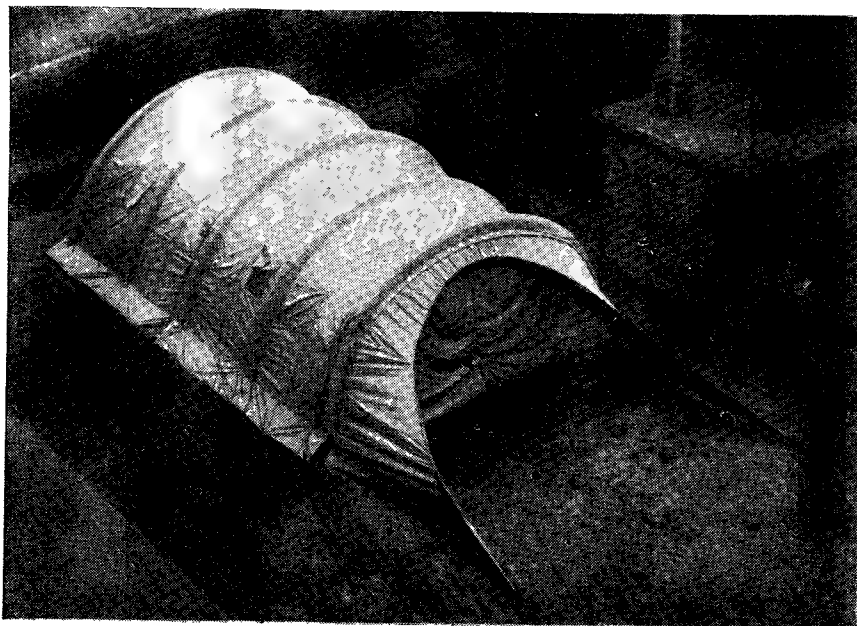


Рис. 6. Экспериментальное пневмокаркасное сооружение

своим качественным параметрам не уступают зарубежной продукции. Одновременно также исследовались и развивались новые методы испытаний качества технических тканей в соответствии с их возможным использованием для изготовления пневматических строительных конструкций. Большое внимание уделялось поведению материала в самой конструкции.

Расчет пневматических строительных конструкций имеет некоторые характерные особенности. Главная из них состоит в том, что нужно учитывать не только прочность и модуль упругости ткани, но и изменение этих параметров со временем. Характерной особенностью тканей, предназначенных для пневматических строительных конструкций, по сравнению с традиционными строительными материалами является заметная потеря прочности в зависимости от продолжительности эксплуатации объекта. Поэтому большое значение имеет определение прочности и модуля упругости в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации готовой конструкции. Для этого был разработан новый метод испытания тканей — баллонный. Из испытуемой ткани изготовили баллон диаметром 40 и длиной 150 см. Концы баллона были зажаты металлическими дисками. На одном из концов был вмонтирован клапан для надувания. Изготовленный таким образом опытный образец надували при первых испытаниях воздухом, а затем, по соображениям безопасности, заполняли водой (рис. 8).

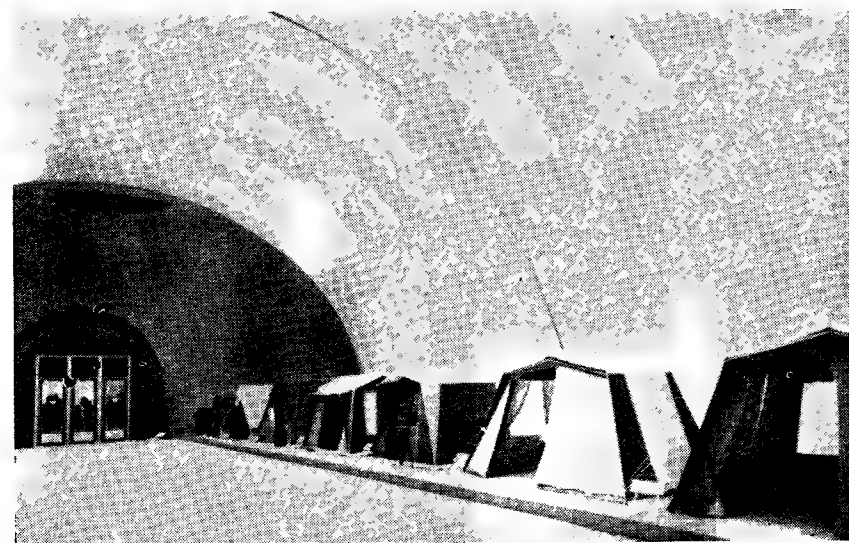
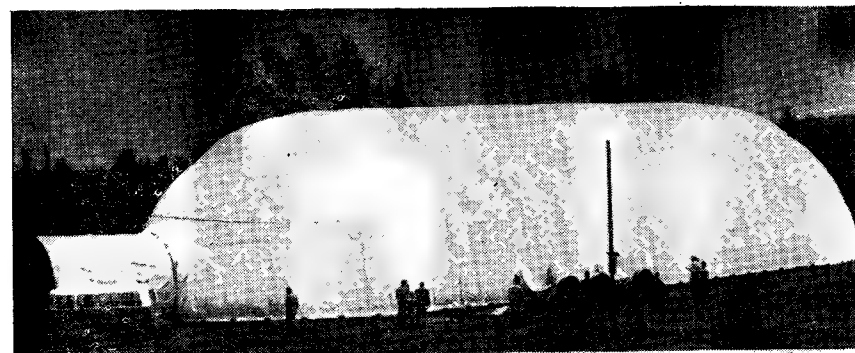


Рис. 7. Воздухоопорное здание, используемое как выставка туристских палаток
вверху — общий вид; внизу — интерьер

В процессе надувания был подвергнут испытанию материал баллона при двухосном напряжении — одновременно по направлениям основы и утка, т. е. так, как это имеет место в конструкции. Регулировка соотношения напряжений по направлению основы и утка возможна при введении дополнительной нагрузки в виде гирь, которые подвешены к баллону. Во время измерений деформаций баллона были определены значения модуля упругости. Критическое внутреннее давление в момент разрыва баллона является определяющим показателем для вычисления прочности испытуемой ткани. Эта прочность существенно отличалась от прочности, полу-

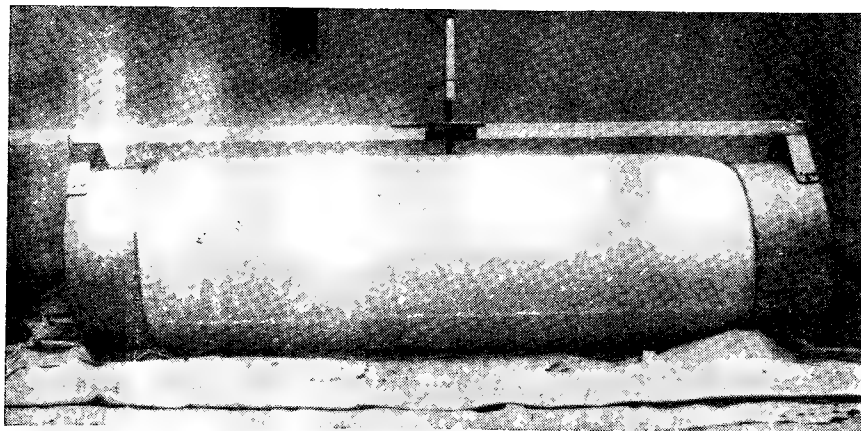


Рис. 8. Опытный образец, изготовленный в виде баллона
вверху — в момент испытаний; внизу — после разрыва

ченной на отрезках образцов ткани, испытанных в соответствии с существующими стандартами. Если необходимо определить истинную прочность ткани исходя из прочности, указанной в паспорте¹, то ее показатели должны учитывать влияние соотношений двухосного напряжения, с одной стороны, и влияние длительного воздействия нагрузки — с другой, а также условия эксплуатации конст-

¹ Имеется в виду кратковременная прочность, определенная испытанием на разрывной машине полоски ткани шириной 50 мм (Прим. ред.).

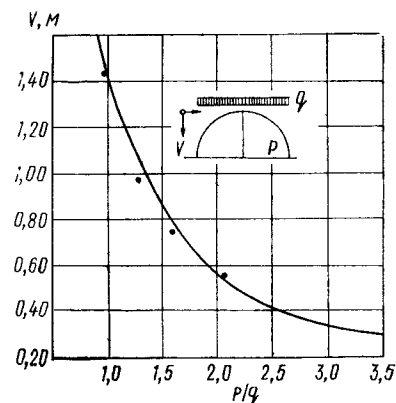


Рис. 9. Сравнение измеренных деформаций (точки) с расчетными (линия)

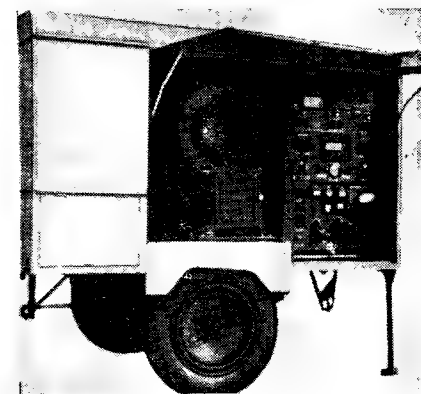


Рис. 11. Передвижной воздухоподымающий агрегат

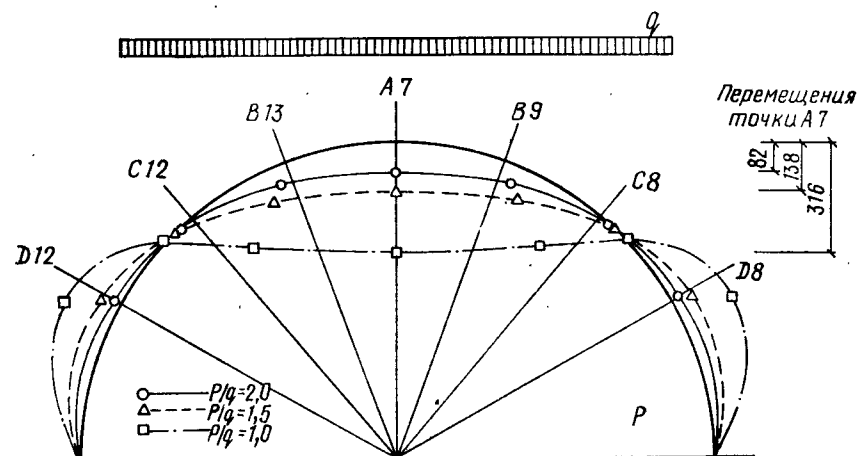


Рис. 10. Перемещения оболочки от симметричной снеговой нагрузки q при разном внутреннем давлении p

рукции и т. д. Влияние всех этих факторов определялось экспериментами, которые проводились в лабораториях и на опытных сооружениях.

Исследования пневматических сооружений в ЧССР проводились несколькими предприятиями. Для сооружений воздухоопорного типа рассматривалось воздействие на конструкцию ветровой и снеговой нагрузок. На поверхности оболочки пролетом 18 и длиной 42 м было намечено 65 точек, где измерялись вертикальные и горизонтальные деформации при разных внутренних давлениях и одновременном нагружении снегом. Измеренные деформации сравнивались с деформациями, полученными расчетным путем (рис. 9 и 10).

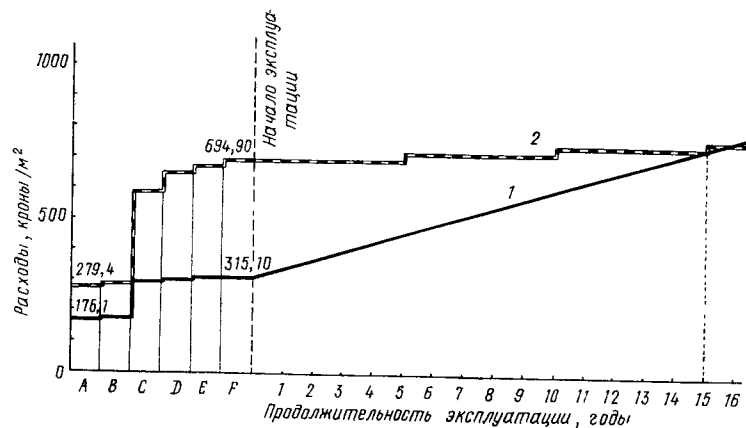


Рис. 12. Ориентировочное сравнение единовременных и эксплуатационных расходов на воздухоопорное и стальное здания

A—F — единовременные расходы; A — отпускная цена здания; B — расходы по перевозке; C — расходы на устройство фундаментов; D — расходы на монтаж; E — стоимость проектирования (привязки); F — расходы на окраску; 1 — расходы на электроэнергию при непрерывной работе вентиляторов воздухоопорного здания 21×57 м составляют 29,3 крон/м² в год; 2 — расходы на антикоррозионную обработку (окраску) здания со стальным каркасом 21×60 м составляют 23,8 крон/м² за 5 лет

Надежность воздухоопорных сооружений зависит от их способности к восприятию всех, даже максимальных, растягивающих усилий в местах крепления к основанию. Определение этих сил ввиду множества факторов, на них влияющих, является нелегкой задачей. Целью исследования крепления воздухоопорных оболочек было определить с помощью как теоретических расчетов, так и измерений, проведенных на натурном объекте, оптимальные требования к условиям крепления и в соответствии с этим предложить наиболее надежный способ крепления. Большое внимание уделялось отработке решений анкеровки мобильных сооружений. Были разработаны винтовые сваи, которые отвечали требованиям не только надежности, но и наиболее облегченного монтажа.

Такое же внимание уделяли исследованию и усовершенствованию соединений тканевых полотнищ. Была изучена возможность использования швов, которые применяются при изготовлении плащевых изделий, для имеющихся конструктивных тканей. Монтажные швы, которыми соединяются отдельные секции оболочки на стройке, заранее проверялись в лабораторных условиях. В ЧССР с успехом применяется «стебельковое» соединение, когда стебельки из ПВХ вплетаются поочередно в кромки секций.

На рис. 11 показан передвижной агрегат с необходимым числом вентиляторов, специально разработанный для воздухоопорных зданий. Включение и выключение вентиляторов производится автоматически в зависимости от внутреннего давления и скорости ветра. В агрегат включен запасной генератор электрической энер-

гии, который обеспечивает работу агрегата при нарушении подачи тока из электросети. Агрегат хорошо зарекомендовал себя на практике.

Исследования пневмокаркасных конструкций были направлены на поиск общего решения конструкции, а также на разработку пневматических арок. Испытанный вариант конструкций показан на рис. 6.

Пневматические арки были испытаны в лабораторных условиях прежде всего с целью установления их несущей способности при различных уровнях внутреннего давления и изменениях в самой конструкции арки. Измерялась несущая способность арок кругового или параболического очертания, исследовались и проверялись некоторые возможности ее повышения путем армирования и др. Были исследованы возможности использования тканей с более высоким модулем упругости, например тканей из стекловолокна, возможности изготовления цельнотканых рукавов криволинейного очертания и т. п.

Оценивая экономику пневматических конструкций, приходится принимать во внимание эксплуатационные расходы, которые превышают расходы на содержание сооружений из традиционных материалов. Поэтому, несмотря на сравнительно небольшие единовременные расходы на приобретение пневматического здания, наступает момент, когда суммарные расходы сравниваемых зданий выравниваются. Наглядное сопоставление двух сооружений — воздухоопорного размером 21×57 м и металлического размером 21×60 м (каркас — стальные рамы, стены и кровля — гофрированная сталь) — показано на рис. 12, откуда видно, что этот момент наступает после 15 лет эксплуатации.

II. Проектирование воздухоопорных зданий

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ВОЗДУХООПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ю. Н. Орса (СССР)

«...дух нашей эпохи заслуживает создания новой формы, отражающей новое положение архитектуры в новом обществе; новой формы, отражающей безграничные технологические возможности; новой формы, содержащей в себе источник прогресса; градостроительной формы, отражающей масштаб наших современных возможностей; формы, соответствующей времени и пространству, отражающей дух развития и движения, обладающей способностью растворяться и исчезать, предоставляя место другой форме, способствуя чудесному процессу вечной метаморфозы».[1].

Повышение интереса к пневматическим конструкциям в последние годы и их широкое и сравнительно быстрое распространение представляют собой вполне естественное и закономерное явление, так как стремительные темпы научно-технического прогресса оказывают значительное стимулирующее влияние на развитие строительной техники и науки, а широкое освоение новых территорий в труднодоступных районах требует создания новых облегченных строительных конструкций и материалов, мобильных, легко монтируемых и демонтируемых, способных работать в самых различных условиях эксплуатации. Этой современной тенденции строительной техники вполне отвечают пневматические сооружения, которые не только являются легчайшими из всех конструкций, созданных человеком за всю его историю, но и работают на совершенно новых принципах.

Во многих странах мира производство пневматических сооружений поставлено на промышленную основу и идет в первую очередь по линии создания индустриальных типовых сооружений многоцелевого назначения, призванных обслуживать различные отрасли промышленности и сельского хозяйства. Однако желание получить при этом только очевидную сиюминутную выгоду привело к тому, что большинство пневматических сооружений, создаваемых в настоящее время, отличается удивительным однообразием и предельным практицизмом, основанным на строжайшей экономии во всем, начиная от технологии и материалов и заканчивая внешним обликом сооружения.

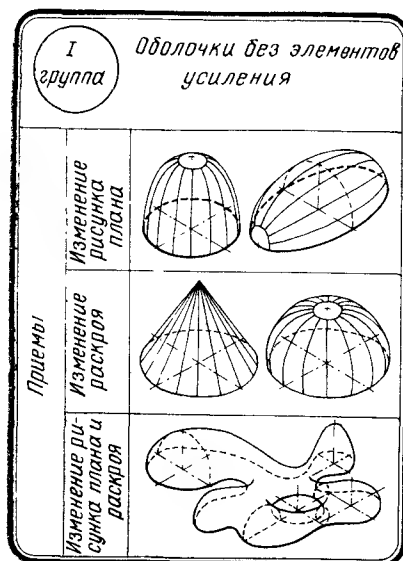
Другая причина однообразия облика пневматических зданий связана с тем, что среди архитекторов они не нашли еще полного признания как объекты творчества. Пневматическими конструкци-

ями в основном занимаются инженеры. Благодаря их усилиям совершенствуются применяемые для пневматических зданий материалы, конструкции узлов и соединений, повышается долговечность, перешедшая в некоторых сооружениях рубеж 20 лет. В то же время остаются нерешенными вопросы архитектурной композиции пневматических сооружений, эстетической организации их объемно-пространственной структуры.

Это явление, увы, не новое. Появление новых материалов и конструкций неизбежно связано с процессом привыкания, художественного освоения их архитекторами, длящегося иногда очень долго. Однако развитие конструкций идет все более интенсивно. Разрыв между идеями, развиваемыми конструкторами, и уровнем подготовленности архитекторов для восприятия и использования ими этих идей возрастает. Уже в 40-х годах А. К. Буров отмечал: «В наше время по сравнению с прежними историческими эпохами невероятно увеличилась скорость развития конструкций. Скорость развития пластической формы увеличилась в меньшей степени» [2]. Как считает немецкий исследователь З. Г. Бегенау, причина этого в том, что «статика традиционной архитектуры породила эстетические предрассудки, не желавшие отступать даже перед новыми возможностями формообразования, открываемыми современной техникой» [3]. Эти трудности понимания тектонической сущности новой конструкции до настоящего времени являются одной из причин бедности форм пневматических сооружений, недостатков их композиционных решений.

Пневматические сооружения отличаются от всех существовавших до их появления конструкций не только иной тектоникой, но и основными элементами и условиями, обеспечивающими существование пневматической формы. Рабочим элементом конструкции стал газ — воздух, находящийся в сжатом или разреженном состоянии по отношению к окружающему пространству. Перед конструкторами возникла проблема обеспечения относительной или полной герметизации всего сооружения или его деталей в зависимости от выбранной конструкции. Это основное условие существования пневматических оболочек может быть сформулировано следующим образом: *пневматическая форма должна иметь замкнутый объем*. Для воздухоопорных конструкций это условие будет относиться к сооружению в целом, для воздухонесомых — к его деталям. Кроме основного условия мы можем выделить основные элементы, определяющие существование пневматической формы. Это *оболочка, воздух и воздухонагнетающая система*.

Для всех типов пневматических конструкций воздухонагнетающая система (вентилятор, компрессор) — обязательный элемент. Японский архитектор Ясуо Уесака так охарактеризовал пневматическую конструкцию: «Наперекор статичным деревянным, бетонным и стальным конструкциям пневматическое сооружение — динамичная машина. Почему машина? Без электроэнергии бездействуют вентиляторы; без вентиляторов сооружение не имеет формы. Все сооружение есть не что иное, как механическая



система, без которой нет сооружения» [4]. Таким образом, характерным отличием тектоники пневматических сооружений является то, что стабилизация формы достигается силой сжатого воздуха, а не гравитацией. По характеру, принципу своей работы пневматические конструкции рвутся вверх; сама конструкция формой, напряженным состоянием отражает работу основного несущего элемента — сдерживаемого воздуха. Плоская форма в пневматических сооружениях невозможна. Плавность, выпуклость — характерный тектонический признак работы пневматической конструкции — это тектоника зримых упругих напряжений.

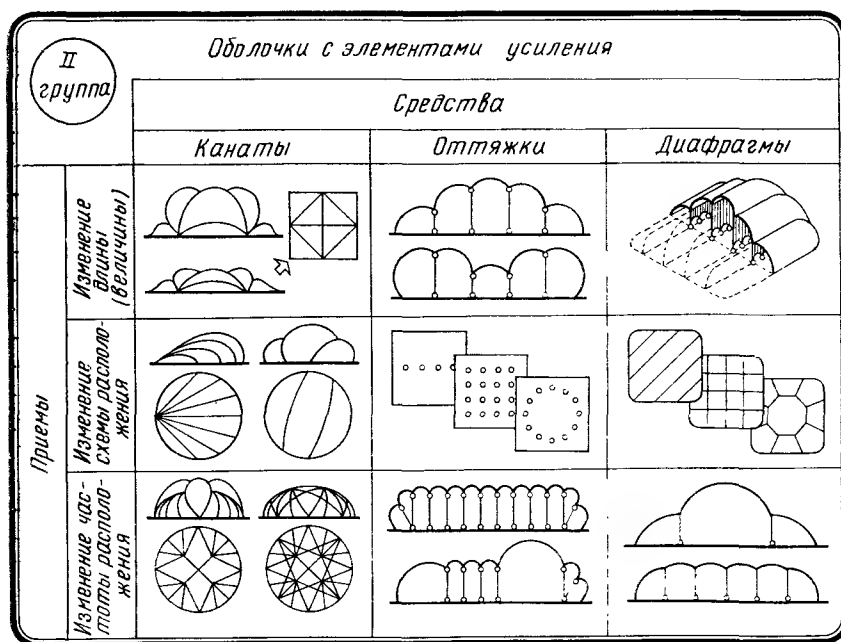
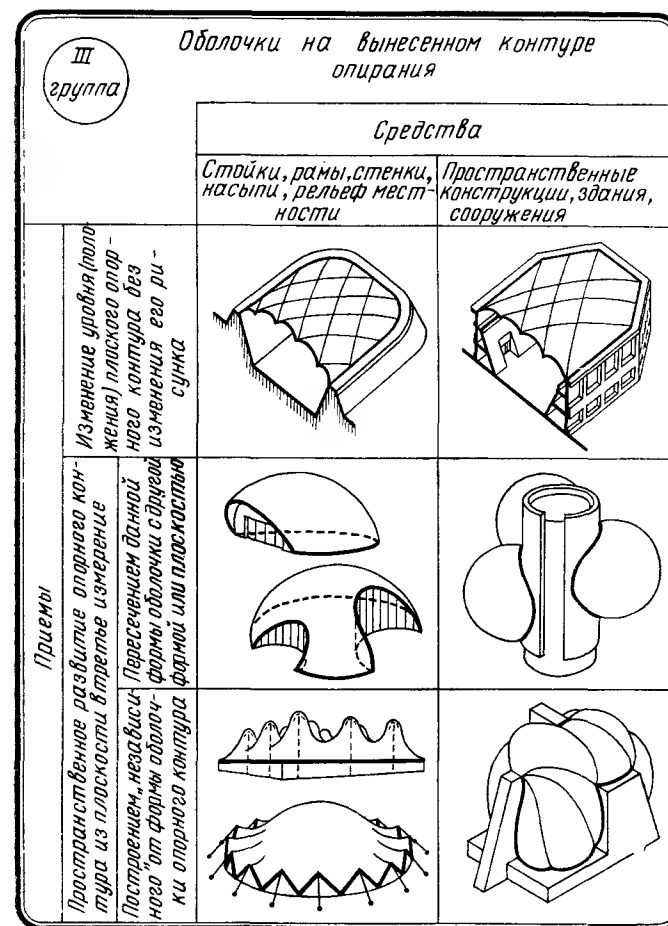


Рис. 1. Основные приемы и средства формообразования воздухоопорных пневматических сооружений



Вопрос поиска архитектурной формы в творчестве архитектора является одним из важнейших. Но, как уже неоднократно указывалось в специальной литературе [5—7], формы и виды пневматических оболочек достаточно многообразны, но не произвольны. Они подчинены строгим законам формообразования и подвержены влиянию многих факторов, ограничивающих свободу проектировщика при работе с ними. Отклонения от рациональной формы (в статическом понимании) в угоду архитектурным или функциональным требованиям приводят к искажению задуманной формы, потере устойчивости или даже к разрушению конструкции. Поэтому знание этих законов и факторов обязательно для архитектора, имеющего дело с пневматическими сооружениями.

Основные приемы и средства формообразования оболочек. Классификация основных средств и приемов формообразования предусматривает разделение их на следующие группы: оболочки

без элементов усиления, оболочки с элементами усиления, оболочки на вынесенном контуре опирания (рис. 1).

Для оболочек без элементов усиления основными приемами формообразования служат: изменение раскроя поверхности оболочки, позволяющее получать на одном и том же контуре плана разные формы, и изменение рисунка плана, когда новая форма образуется только трансформацией жесткого опорного контура без изменения избранного приема раскроя. Оба приема могут применяться совместно, открывая третье направление формообразования этой группы оболочек. Характерной особенностью пневматических оболочек без элементов усиления является плавность (гладкость), мягкость формы, без резких переломов при переходе от одного вида поверхности к другому.

Оболочки с усиливающими элементами обладают значительно большим арсеналом приемов и средств формообразования. К элементам усиления воздухоопорной оболочки относятся такие элементы конструкций, которые, будучи непосредственно связанными с ней, принимают на себя существенную часть усилий, возникающих в оболочке, образуя с материалом оболочки тектонически родственное сочетание. К усиливающим элементам, которые одновременно являются и средствами формообразования, относятся канаты и сети из них, канатные оттяжки, мягкие (тканевые) диафрагмы, ткани в роли тентовых элементов.

Основной прием формообразования оболочек с элементами усиления заключается в применении линейных и точечных элементов стабилизации формы. Одновременно могут применяться другие приемы формообразования, используемые для оболочек без элементов усиления: вариации раскроя или изменение рисунка плана. Для оболочек с элементами усиления характерны резкие перегибы, переломы, даже «разрывы» формы. Формообразование оболочек этого типа очень сложно, и основным сравнительно простым и надежным способом контроля и проверки правильности их форм следует считать изготовление мягких моделей.

Модели, образуемые мыльной пленкой, дают идеальное решение задачи с точки зрения распределения усилий в материале оболочки. Однако далеко не все формы, получаемые с их помощью, могут быть приняты в качестве образца для непосредственного воплощения в реальные сооружения, так как не каждая из них будет соответствовать функциональным и технологическим требованиям, предъявляемым к проектируемому объему.

Для моделей из мыльных пленок ограничен также диапазон получаемых форм из-за трудности их выполнения. Особенно сложно, а в большинстве случаев невозможно создать модель на комбинированном плане или с канатным усилением. Кроме того, трудно измерить координаты поверхности таких пленок и перевести на графический язык чертежа; их размеры и время существования ограничены. Более подходящими для исследования являются модели из резиновой пленки, которой придано небольшое предварительное натяжение. Они позволяют проводить многие необходимые

измерения и, в отличие от мыльных пленок, применять канаты и сети. Кроме того, они более удобны для фотографирования при использовании перспективного совмещения и способа рирпроекции.

Пределы изменения формы резиновых моделей ограничены, однако они дают возможность получать формы, наиболее полно соответствующие природе пневматической оболочки, создавать модели сооружений, в которых прочностные свойства материала могут быть использованы наилучшим образом. Отклонения от форм, полученных в результате моделирования, возможны, если они не лишают сооружение тектонического единства и не противоречат основной идее формообразования пневматических оболочек.

Исследования на моделях пневматических оболочек с канатным каркасом позволили выявить ряд приемов управления их формой, которая зависит от выбранной системы расположения канатов, их длины и частоты расположения.

К большим достоинствам оболочек, усиленных канатами, нужно отнести архитектурную выразительность и тектоничность. Хотя, например, сферические оболочки и представляют собой конструктивно наиболее совершенную пневматическую форму, они сами по себе, без дополнительной обработки, недостаточно ярко выражают тектонику мягких оболочек. Перетяжка их канатами наглядно выявляет упругость оболочки, стремящейся вырваться из сдерживающих пут. Она, как живое существо, вырывается активнее в тех местах, где свободнее, шире пространство между канатами, подчеркивая динамический характер всей конструкции.

Опыты на моделях позволили, помимо решения конкретных вопросов формообразования, найти ряд интересных форм пневматических оболочек. Некоторые из них приведены на рис. 2.

Можно выделить несколько основных схем расположения канатов по поверхности оболочки: одиночный канат, параллельную, радиальную, кольцевую, хордовую, звездчатую схемы и группу сетчатых (рис. 3). Соединение перечисленных схем друг с другом дает возможность образовывать неограниченное число сочетаний. Эти же схемы расположения канатов диктуют характер возможных фактур, образуемых сетями и канатами.

Применение канатов и сетей открывает весьма широкие возможности формообразования воздухоопорных сооружений. Эффект воздействия этих усиливающих элементов на форму пневматической оболочки отличается широким диапазоном. Одно из преимуществ канатов как средств усиления оболочки состоит в том, что внутреннее пространство сооружения остается совершенно свободным от каких бы то ни было конструктивных элементов.

Другие возможные элементы усиления — оттяжки и диафрагмы (см. рис. 1, группа II), используемые в качестве формообразующих средств и образующие на поверхности оболочки точки или линии, — сложнее по конструкции и расчленяют внутреннее пространство сооружения, ограничивая величину пролета и свободу планировки. Применение оттяжек усложняет проблему отвода воды с поверхности оболочки. Кроме того, оттяжки не обеспечивают

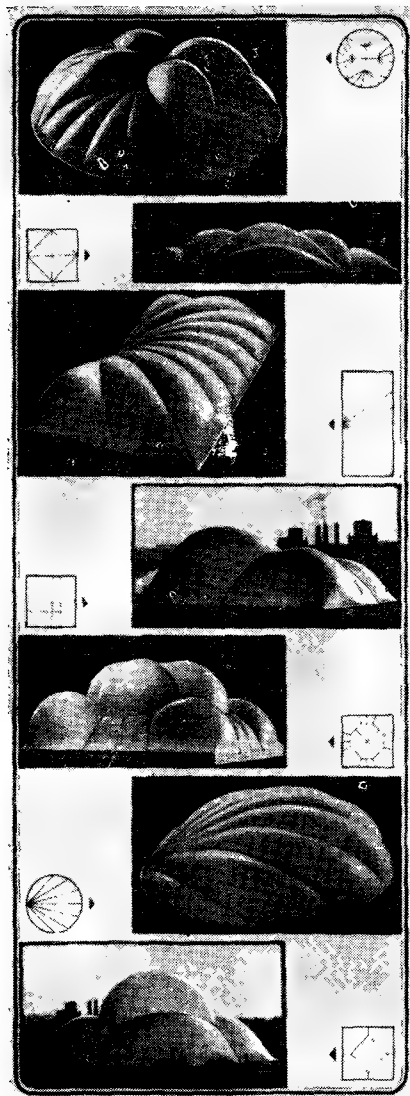


Рис. 2. Формы пневматических оболочек, полученные на моделях

столь широкого разнообразия получаемых с их помощью форм, как другие элементы усиления. Достоинство тканевых диафрагм (особенно в тех случаях, когда они применяются совместно с оттяжками) состоит в том, что они дают возможность в довольно широких пределах изменять форму линий пересечения (перехватов, впадин) оболочек и отдельных участков их поверхности (от кривых до прямых и ломаных линий). Подобное свойство диафрагм делает их

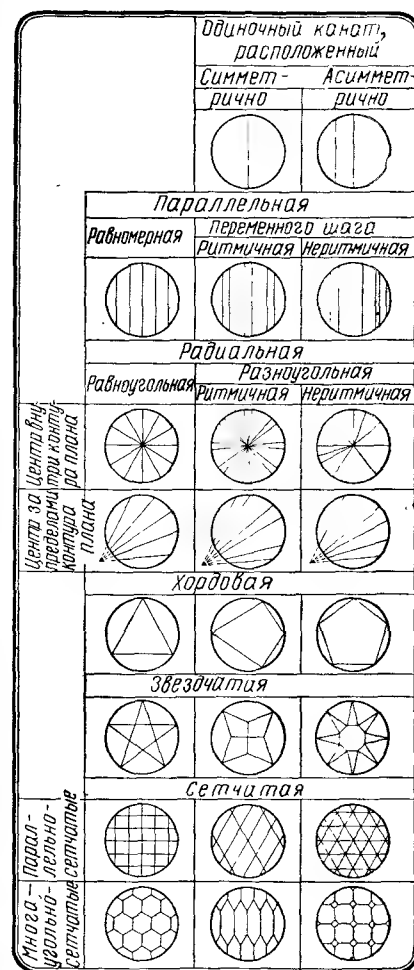


Рис. 3. Схемы расположения канатов по поверхности оболочек

незаменимыми в ситуациях, требующих существенного отклонения проектируемой формы сооружения от идеальной, «диктуемой» на данном плане (опорном контуре) мыльной пленкой, или при необходимости организовать водосток с поверхности оболочки в нужном направлении.

Особого внимания заслуживает прием создания разнообразных форм пневматических воздухоопорных оболочек и сооружений, названный «методом вынесения опорного контура сооружения без изменения его рисунка или с пространственным развитием его опорного контура из плоскости в третье измерение (см. рис. 1, группа III). В последнем случае прием формообразования распадается на два дополнительных приема. Один — построение независимого от формы пневматической оболочки опорного контура, который является основой для создания новой формы. Другой — вписывание опорного контура в имеющуюся форму методом сечения, т. е. построение зависимого от формы опорного контура как линии пересечения формы оболочки с другой формой (поверхностью) или плоскостью. Последний прием при сравнительной простоте дает красивые и выразительные по рисунку линии опорного контура, значительно оживляющие пластику даже несложных по своей исходной форме пневматических оболочек.

Для поднятия опорного контура в качестве средств формообразования могут использоваться стенки или насыпи различной высоты. Конструкциями опорного контура могут служить также арки, рамы, различные части зданий и сооружений. При этом оболочка может в одних случаях рассматриваться как основная часть конструкции, в других — как основная или подчиненная часть сооружения.

Характерным примером вынесения опорного контура служат пневматические линзы (подушки), у которых часть контура располагается между оболочками линзы. При вертикальном положении опорного контура линзы образуют стены и ограждения, при горизонтальном — покрытия. Для линз может быть применен и пространственный каркас значительных размеров, несущий на себе множество пневматических оболочек. В этом случае подушкообразные оболочки выступают как часть конструкции покрытия сооружения. Если же в роли опорного контура используется здание или сооружение, имеющее также и самостоятельное функциональное назначение, тогда пневматическая оболочка представляет собой часть сооружения, выполняющую обычно роль покрытия или пристройки. В подобных случаях можно говорить о том, что метод вынесения опорного контура приобретает также свойства одного из композиционных приемов проектирования зданий, оставаясь при этом в категории приемов формообразования пневматических воздухоопорных оболочек.

Метод вынесения опорного контура значительно обогащает палитру архитектора в работе над формой пневматического сооружения. Преимущества этого метода в том, что он, включая в себя

рассмотренные ранее I и II группы приемов и средств формообразования, предоставляет возможность чрезвычайно широко варьировать форму не только пневматической оболочки, но и всего сооружения в целом. Он обогащает его пластическое, композиционное решение такими элементами, которые невозможно получить при использовании только одной какой-либо группы приемов и средств формообразования.

Особенности построения объемно-пространственной структуры пневматических сооружений. Специфичность приемов и средств композиционных пневматических оболочек продиктована прежде всего ясно выраженной *тектоничностью формы*, проявляющейся в строгом следовании законам формообразования, в отсутствии «лишнего» материала, которым можно было бы скрыть или исказить истинную тектонику формы (случай, когда конструкция и архитектурная форма сливаются в одно целое), в характерной геометрии формы и деталей и т. п. Тектонизация формы в пневматических сооружениях достигла наибольшей степени — пневматическая оболочка не может быть не тектоничной.

На характер объемно-пространственного решения пневматических сооружений воздухоопорного типа одно из самых существенных воздействий оказывает основное условие их существования — *необходимость герметизации* внутреннего эксплуатируемого пространства. Герметизация исключает устройство сквозных отверстий в пневматической оболочке, ограничивает свободу входа и выхода. Необходимость устройства воздушных шлюзов определенных размеров, а также зависимость функционально-планировочной организации всего сооружения от габаритов и конструкций входных устройств несколько ограничивает пределы универсального использования внутреннего пространства и самым непосредственным образом влияет на композиционное построение всего сооружения.

Новизна материалов и необычность тектоники пневматических сооружений выдвигают новые композиционные принципы и новые эстетические свойства и качества, выражающиеся в гибкости, легкости (иногда прозрачности) формы и конструкции, новых структурных и цветовых характеристиках материалов.

Легкость — один из композиционных принципов, который можно сформулировать как противопоставление тяжести. Это одно из труднейших для освоения эстетических свойств, так как выявление действительной легкости пневматической формы почти невозможно ни одним из композиционных приемов и средств традиционной архитектуры тяжести. В значительной мере решить эти задачи можно широким применением катенарных силовых поясов, тентовых диафрагм, оттяжек и усиливающих формообразующих и рельефообразующих канатов в сочетании с гармоничным использованием света и цвета. Кроме того, легкость может найти достаточно яркое выражение в специфике самой формы пневматической оболочки. Однако сильнейшее из средств выражения легкости — возможность изготовления полностью прозрачной оболочки.

Под *гибкостью* пневматической оболочки, стабилизированной внутренним давлением воздуха, понимается возможность достаточно заметной ее деформации при действии внешних нагрузок. Это свойство оказывает влияние на ряд факторов:

выбор формы оболочки в целом (требования обеспечения устойчивости сооружения при воздействии ветровой и снеговой нагрузок);

характер эстетической обработки ее поверхности (свобода размещения элементов усиления оболочки — канатов, оттяжек, диафрагм — часто ограничивается расчетом и задает характер формы и фактуры);

архитектурное решение внутреннего пространства пневматического сооружения (расположение имущества и оборудования на достаточном расстоянии от внутренней поверхности оболочки).

Но гибкость — это также современный, развивающийся и характерный для пневматических сооружений композиционный принцип, который означает применительно к воздухоопорным оболочкам изменение формы во времени и в пространстве, способность сооружения к трансформации, возможность дальнейшего роста, развития и перемещения объекта, а также универсальность использования внутреннего пространства, т. е. гибкость изменения внутренней планировочной структуры.

Возможность создания пневматических оболочек грандиозных размеров, характерное для них отсутствие конструктивных членений, а также привычных архитектурных деталей, деталей-знаков, деталей-символов, достаточно четко обозначающих для зрителя масштаб сооружения, особенно остро ставит перед архитектором проблему *масштабности*. Подобная ситуация может привести или к непониманию формы архитектурного сооружения, или к прямому протесту против нее, потому что «гармония формы, достигнутая вне связи с ассоциациями, не затрагивает глубин человеческого сознания, не обращена к тому, что хранится в памяти человека» [8]. Возникает трудность установления масштабных соответствий. Архитектор, работающий над этой проблемой, должен находить специальные средства выявления масштаба пневматических оболочек.

Укрупнение масштабных соотношений выдвигает другой композиционный принцип проектирования пневматических сооружений — поиск *соразмерности*, который определяется как «соизмерение архитектуры с человеком, как учет закономерностей его восприятия и как связанная с этим мера разнообразия и единообразия архитектурной среды» [9]. Сверхкрупный масштаб оболочек требует введения элементов, обеспечивающих согласованный переход к более мелкому масштабу, рассчитанному на восприятие человеком с близких точек зрения. На этом пути одним из ключевых приемов выявления основных элементов композиции остается *контраст*. Из многочисленных видов контрастных сочетаний (например, контрастное сопоставление формы оболочки с фоном массовой застройки города, строгой геометричностью промышленной

зоны или построек традиционной тектоники; сопоставление мягкого и жесткого — оболочки и жесткой конструкции входа и т. п.) для поиска необходимых масштабных соотношений основное значение будет иметь контрастное соотношение оболочки по величине и форме к другим, более мелким элементам композиции. Эта задача относится к одной из труднейших, так как пневматические оболочки в силу своих конструктивных и тектонических особенностей обладают цельностью и единством характера формы, сложностью получения мелких членений, значительной зависимостью характера цветовых пятен от системы раскрытия и т. п. В этих условиях указателями масштаба в зависимости от точки зрения могут выступать разные элементы: для дальних точек зрения — окружение и сама форма сооружения, для ближних — детали формы, технические элементы, цветовые акценты.

Сила воздействия всех этих элементов на зрителя будет в значительной степени зависеть от их размеров, пропорций, геометрической формы, характера освещения и окраски. Таким образом, художественная выразительность пневматического сооружения определяется формой, деталями формы, техническими элементами, светом и цветом, природным окружением.

Формы пневматических сооружений характеризуются прежде всего мягкостью, плавностью, криволинейностью очертаний — свойствами, заложенными в самом конструктивном, тектоническом принципе пневматических оболочек. Такие свойства формы облегчают достижение главного композиционного качества сооружения — целостности, единства характера формы, но затрудняют ее пропорционирование, использование ритмических членений, ограничивают пластические возможности формы и поверхности, сужают диапазон объемно-пространственных решений, построенных на контрастных сопоставлениях.

Трудности пропорционального членения пневматических оболочек различных форм, лишенных привычных архитектурных элементов и деталей, приводят к тому, что в процессе восприятия их формы важную роль начинает играть *силуэт* сооружения, который несет в себе значительную долю общей информации и оказывает существенное влияние на эмоциональный характер оценки этой информации.

Художественный язык архитектуры приобретает новые черты. Кривая линия выступает как самостоятельный эстетический элемент, открывая возможность создания пластически богатой архитектуры, архитектуры-скульптуры. Говоря о тентовых конструкциях, Курт Зигель отмечает: «Проектирование палаток скорее является делом скульптора с хорошим чутьем пластической формы, чем делом инженера» [10]. Эта идея может быть целиком и даже с большим основанием отнесена к пневматическим сооружениям.

Действительно, анализ истории развития пневматических сооружений и конструкций показывает, что большинство получивших широкую известность, имеющих неоспоримые архитектурные достоинства пневматических сооружений, отличается от массовых, се-

рийно выпускаемых оболочек именно необычностью их очертаний (*силуэта*), скульптурностью формы. Американский архитектор В. Ланди, проектируя пневматическую оболочку над помещением закусочной для одной из выставок, предварительно лепил ее модель из пластилина. Будучи одним из пионеров в области создания оригинальных архитектурных форм пневматических сооружений, он представляет себе «надувные конструкции как новое средство, позволяющее создавать огромные архитектурные скульптуры и пространства для человека с крупными, великолепными штрихами. Это подобно новой палитре для художника» [11].

В зависимости от характера формы можно выделить различные точки зрения, с которых силуэт воспринимается лучше или хуже. Так, для восприятия с высоких точек зрения в качестве силуэта может выступать также и контур плана (например, в ряде моделей Ф. Отто, выставочном павильоне «Атомы для мира» В. Ланди и т. п.).

План, или «пятый фасад», приобретает в современной архитектуре все большее значение, особенно для большепролетных пневматических сооружений, где сама оболочка здания составляет основу его композиции и должна быть поставлена в наилучшие условия восприятия.

Следующей важной композиционной особенностью пневматических воздухоопорных оболочек является ярко выраженная *индустриальность* их заготовления, проявляющаяся в характере материала и его окраски (ткань, пластмассы), в типовых элементах конструкции: одинаковом размере полотнищ ткани, стандартизованных элементах входов и узлов крепления, серийно изготовляемом комплектующем оборудовании (вентиляторные и отопительные установки и др.), а также в самом процессе эксплуатации (необходимость постоянной работы механизмов, обеспечивающих поддержание проектной формы сооружения и определенных эксплуатационных характеристик). Эта особенность требует от архитектора находить такие художественные средства, которые одновременно с выражением определенного способа производства всего сооружения или отдельной его детали не противоречили бы задуманной эстетической идее и не снижали бы ее значимости в общем композиционном строе всего сооружения, тем более, что высокая степень индустриальности и ярко выраженная тектоничность пневматических сооружений ограничивают применение материалоемких декоративных пластических средств, оставляя проектировщику основные средства — свет и цвет.

Для пневматических сооружений особенно важен точный учет распределения светотени по их поверхности, имеющей, как правило, довольно большой радиус кривизны. Из-за малой кривизны поверхности распределение светотени на оболочке получается очень мягким и плавным, а границы тени — расплывчатыми и неяркими. Форма, как уже говорилось, выявляется в основном за счет силуэта. Усилить выявление формы светом можно путем образования на поверхности оболочки активно выраженного релье-

фа (с помощью канатов, диафрагм, оттяжек). Игра светотени на рельефе и ритмическое перспективное сокращение его элементов способствуют более четкому прочтению формы сооружения и его композиции.

Совершенно новой композиционной особенностью пневматических сооружений является возможность делать на их поверхности просвечивающие полосы или вставки любой формы и любых размеров, как связанные, так и не связанные с раскрыем оболочки, но не ограниченные конструктивными рамками переплетов. Одновременно с этим можно встраивать в оболочку и окна обычного типа в жесткой раме или прикреплять оболочку к несущей застекленной раме или жесткой остекленной конструкции. Кроме того, вся поверхность воздухоопорной оболочки может быть сделана совершенно прозрачной. Возникло новое тектоническое свойство, присущее исключительно пневматическим конструкциям — *прозрачная конструкция*. Так, если в традиционных зданиях для создания нужного уровня естественного освещения в интерьере необходимо было делать специальный достаточно прочный каркас, способный нести на себе значительную площадь остекления, то в пневматических сооружениях сама просвечивающая поверхность является несущей конструкцией. Роль каркаса и остекления выполняет одна и та же оболочка. Окном становится все сооружение.

Только пневматические сооружения позволили, наконец, осуществить извечную мечту архитекторов о единстве природы и архитектуры, когда сооружение, выполняя свою основную миссию создания определенного микроклимата и защиты от вредного воздействия многих факторов окружающей среды, в то же время остается полностью раскрытым в природное окружение. Полностью прозрачная оболочка, лишенная каких-либо конструктивных непрозрачных элементов кроме едва заметных швов, представляет собой яркий пример подобного рода. В то же время продуманное применение прозрачных материалов в сочетании с непрозрачными делает пневматические оболочки зрительно очень легкими, позволяя создавать у наблюдателя ощущение буквально парящего в воздухе сооружения.

Оболочки, выполненные целиком из полупроницаемого для света материала, раскрыли для архитекторов неожиданное направление *светотеневого оформления интерьера*. Такие оболочки оказались в роли светотеневого экрана, подобно экрану в театре теней. Окружающий ландшафт и постройки, особенно в утренние и вечерние часы, когда солнце стоит невысоко над горизонтом, отбрасывают на поверхность оболочки тени, четко читающиеся с внутренней стороны сооружения. Возникающая картина теней не остается постоянной, а меняется как по форме, так и по цвету по мере движения солнца по небосклону. Это явление также активно способствует созданию ощущения единства наружного и внутреннего пространства, но на принципиально новой основе (рис. 4).

Искусственное освещение интерьера пневматических сооружений также имеет свою специфику, обычно редко учитываемую на

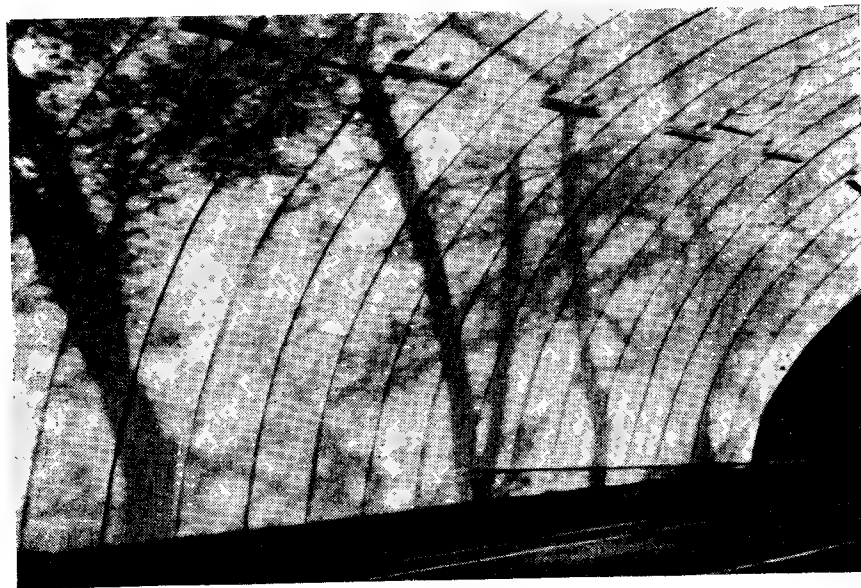


Рис. 4. Рисунок теней на внутренней поверхности пневматической оболочки

практике. Чаще встречается формальное отношение к устройству и размещению светильников, что снижает качество архитектуры пневматических сооружений. К характерным недостаткам можно отнести следующие: случайное размещение источников света, не связанное с архитектурным решением внутреннего пространства сооружения; неправильный выбор типа светильников и характера освещения; недостаточные уровни освещенности; отсутствие стилистического единства в архитектуре светильников и сооружения, а также осветительных установок и арматуры, специально разработанных для размещения под пневматической оболочкой; игнорирование широких эстетических и формообразующих возможностей, которое несет в себе применение пневматических отражателей, абажуров, люстр и т. п. Конечно, то обстоятельство, что воздухоопорная оболочка не приспособлена по своему конструктивному принципу для прокладки тяжелых осветительных и других коммуникаций, несколько ограничивает число решений, предусматривающих размещение светильников на внутренней поверхности оболочки, однако число других возможных вариантов устройства освещения исключительно велико. Из них представляет интерес освещение оболочки светильниками, вмонтированными в пол, а также установленными снаружи, когда внутреннее пространство освещается светом, проходящим сквозь оболочку, и применение пневматических световодов.

Выбор определенной системы искусственного освещения требует особой ответственности от архитектора, проектирующего возду-

хоопорное сооружение из светопроницаемых материалов, так как свет, проходящий наружу сквозь оболочку, оказывает существенное влияние на выявление и формирование «ночного фасада» сооружения.

Одним из важных элементов в композиции пневматических сооружений являются *входы*. Сама по себе пневматическая оболочка, будучи выполненной из однородного, нередко одноцветного материала, не имеет на своей поверхности заметных акцентов. Чаще всего роль активных композиционных акцентов выполняют входы. Поэтому характер их архитектурного решения оказывает значительное влияние на общее впечатление от всего сооружения.

Один из вариантов решений входов, а именно входы, полностью заглубленные в грунтовую насыпь, представляет особый интерес, поскольку грунт, будучи очень «пластичным», «скульптурным» материалом, не связанным строгими конструктивными рамками, позволяет очень гибко и неповторимо разрешать стоящие перед проектировщиком архитектурно-художественные и планировочные задачи.

Для пневматических оболочек, устанавливаемых стационарно, большие архитектурно-композиционные возможности открывает прием совмещения входов в сооружения с вентиляторными и отопительными установками или с подсобными помещениями (раздевальнями, гардеробами, кассами и т. п.). Такое решение помогает сравнительно простыми средствами избавиться от раздробленности композиции и стиливой разобщенности этих основных конструктивных и функциональных элементов пневматических сооружений, усиливает значимость входа и целесообразно во всех случаях, когда позволяет проектное задание и окружающая застройка. Возможность объединить их в одной конструкции дает и некоторые экономические выгоды — в устройстве фундамента, сокращении числа стен и т. п. На рис. 5 показаны возможности применения цвета для создания ярко акцентированного входа, а также особенности построения простых и сложных ритмов с использованием нескольких входов различных конструктивных типов.

Однако чаще всего мы встречаем примеры, когда композиционное размещение входов в большинстве пневматических сооружений не отличается оригинальностью и преследует в основном чисто утилитарные цели. В редких случаях (как правило, в выставочных павильонах) встречаются входы, представляющие собой единое композиционное целое и несущие существенную эстетическую нагрузку. Недооценка композиционной значимости входа выступает со всей очевидностью как в недостатках системы их размещения, так и в неудачном применении цвета, плохом качестве изготовления ряда деталей и узлов стыковки отдельных элементов конструкции входа между собой и с сооружением в целом.

Вход в сооружение — один из основных элементов, дающих правильное ощущение масштаба. Кроме него, в качестве указателей масштаба выступают также и конструктивные элементы оболочки. Это прежде всего анкерные устройства и силовые пояса,

вентиляторные и отопительные установки, усиливающие канаты, диафрагмы, оттяжки и швы. Конструкция, характер архитектурного решения силового пояса часто определяют тектоническое звучание всего сооружения в целом. *Силовой пояс* — тот элемент сооружения, где усилия от покрытия, оболочки передаются на фундамент. Проводя параллель с традиционными формами архитектуры, можно сказать, что катенарный силовой пояс подобен ордерной системе. Во все времена тектонику сооружения особенно ярко выявляли те элементы сооружения, где происходила передача усилий от одной части конструкции на другую. Так, в ордерной системе такими элементами были капитель и база, где нагрузки от перекрытия через колонны передавались на основание, фундамент сооружения. Развивая это сравнение дальше, можно сказать, что прямой кромочный силовой пояс воздухоопорных зданий с использованием контурных труб представляет собой стеновую систему, катенарный пояс — аркады, а оттяжки — колонны. Однако существенное отличие заключается в том, что в классической ордерной системе колонна (стена) всегда вертикальна по направлению силы тяжести (гравитации), а в пневматических сооружениях колонны — тросы — могут принимать любое положение в зависимости от направления действующего усилия.

Перед архитекторами возникла задача передать в художественно-образной форме эффект отрыва от земли, парения, удержания оболочки. Значительный эффект в этом отношении дает использование катенарных силовых поясов, которые являются одним из важнейших элементов архитектуры пневматических оболочек, помогают выявить тектонику и форму сооружения, указывают масштаб, образуют необходимый ритмический строй и пропорциональные отношения частей. На рис. 6, а и б видно, что применение даже простейшего катенарного пояса позволяет улучшить тектоническую характеристику оболочки «чистой», гладкой формы, показать работу конструкции. Введение цвета в тот же катенарный пояс зрительно усиливает отрыв оболочки от земли (рис. 6, в), а применение катенарных кривых разной высоты дает возможность построить выразительный метро-ритмический ряд (рис. 6, г). Сочетание обычного катенарного силового пояса и катенарно-тентового, особенно при наличии канатных оттяжек, может давать многоплановое глубинно-пространственное решение даже очень простой в своей основе пневматической формы (рис. 6, д и ж). Катенарные кривые нарастающего ритма могут подчеркивать место расположения входа в сооружение (рис. 6, е).

На первых этапах развития пневматических конструкций, когда вопросы экономики и проблемы отработки основных конструктивных решений узлов и деталей отодвигали на задний план архитектурно-художественные задачи, было преждевременным ставить вопрос об организации специализированных предприятий по производству комплектующего оборудования, узлов и деталей на высоком эстетическом уровне. Однако в настоящее время, при массовом серийном производстве пневматических сооружений, такая

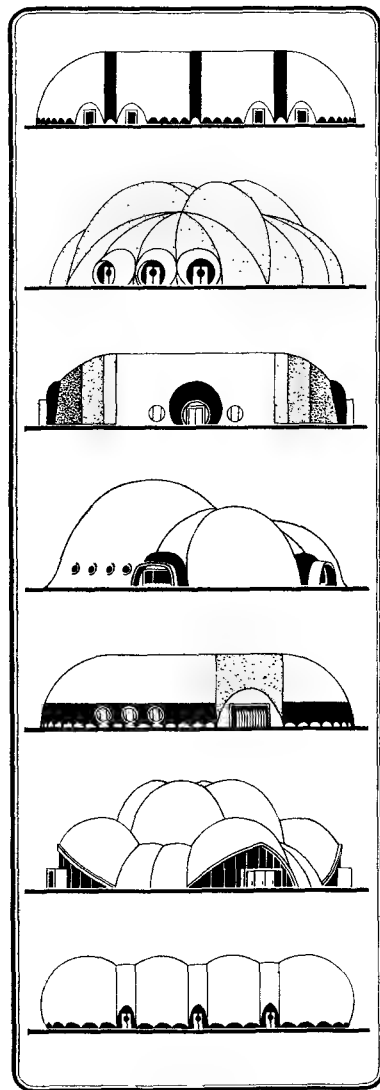


Рис. 5. Варианты решения входов в пневматические сооружения (цвет показан условно)

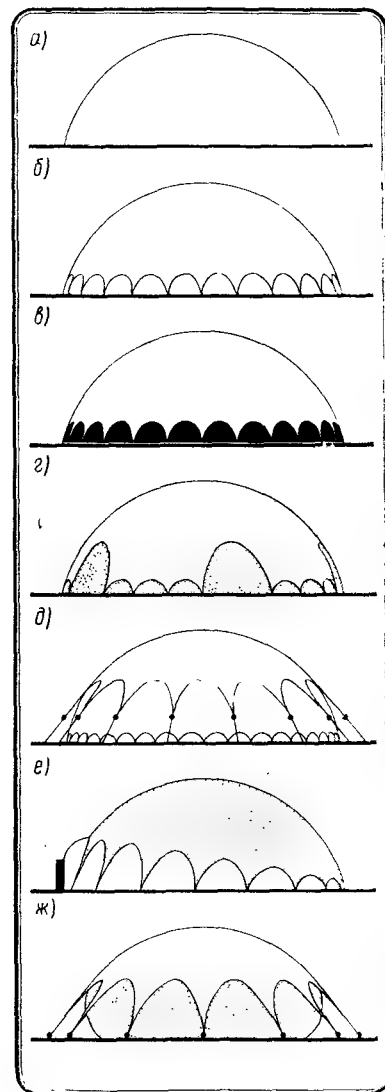


Рис. 6. Влияние катанарного силового пояса на пространственно-текtonическую характеристику оболочки простой гладкой формы

задача становится весьма актуальной. Многие конструктивные элементы этих сооружений часто заимствуются из других областей техники и машиностроения, что отрицательно сказывается на общем впечатлении от всего сооружения. К таким элементам можно отнести анкера, коуши, крепежные узлы для оболочки и другие

детали силовых поясов, вентиляторные и отопительные установки, входы и их детали и т. п. Если наладить их специализированное изготовление, может получиться так, что промышленное производство этих элементов и узлов большими сериями на заводах породит их унылое однообразие. Здесь уместно привести следующее высказывание: «Штамп, шаблон, унылую похожесть порождает не стандартизация, а примитивная технология» [12].

Другой важной проблемой проектирования и строительства пневматических сооружений является создание специальных материалов с заранее заданными свойствами по заказу архитекторов. «Изготавливать массовую промышленную продукцию только по заказам зодчих, только необходимого ассортимента и качества — это требование времени, которое заставляет нас ломать старые привычки и традиции» [12]. Необходимость такой ломки старых привычек и традиций наиболее остро чувствуется в архитектуре пневматических сооружений, широкое развитие и распространение которых оказалось возможным благодаря появлению полимерных строительных материалов, созданных на основе новейших достижений химии.

И если говорить об архитектуре пневматического здания, о единстве стиля, то художественное решение даже небольшой детали, передача через ее форму действующих в ней усилий и характера тектоники всего сооружения, а следовательно, и стиля имеет большое значение для цельности его эстетического восприятия. Так, фальшивое звучание даже одной ноты может испортить впечатление от прослушивания всего музыкального произведения.

Вывод может быть только один — дальнейшее совершенствование архитектуры пневматических воздухоопорных сооружений должно идти при широком участии архитекторов в их проектировании и строительстве на основе создания специализированных производственных объединений, комплексно решающих все проблемы производства оболочек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кандилис Ж. Формы и функция. — В сб.: Зодчество, № 1. М., Стройиздат, 1974.
2. Буров А. К. Об архитектуре. М., Стройиздат, 1960.
3. Бегенау З. Г. Функция, форма, качество. М., Мир, 1969.
4. Ясуо Уесака. Павильон США. Прспект фирмы Тайо Когно.
5. Ермолов В. В. Воздухоопорные здания и сооружения. М., Стройиздат, 1980.
6. Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции. М., Стройиздат, 1967.
7. Пневматические конструкции воздухоопорного типа. (Под ред. В. В. Ермолова. М., Стройиздат, 1973.
8. Шевелев И. Ш. Логика архитектурной гармонии. М., Стройиздат, 1972.
9. Кириллова Л. И. Основные принципы композиции. — В кн.: Композиция в современной архитектуре. М., Стройиздат, 1973.
10. Зигель К. Структура и форма в современной архитектуре. М., Стройиздат, 1965.
11. Lundy V. A. Architectural and sculptural aspects of pneumatic structures. — Proceedings of the 1st International Colloquium on pneumatic structures, Stuttgart, 1967.
12. Айрапетов Д. П. Материал и архитектура. М., Стройиздат, 1978.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ НА МЕЖДУНАРОДНЫХ ВЫСТАВКАХ

Ю. Мурата (Япония)

Идея проведения выставок, рассчитанных на массового посетителя, родилась во Франции в эпоху Директории. Первая такая выставка была открыта на Марсовом поле в Париже в 1798 г. — за год до того, как правительство Директории пало в результате переворота, совершенного Наполеоном.

В первые же дни Французской революции, в августе 1789 г., Учредительное собрание провозгласило «Декларацию прав человека и гражданина», вызвавшую небывалое одобрение и шумный общественный отклик. Установленное «Декларацией» политическое равенство всех граждан предстояло теперь дополнить свободой выбора рода занятий, поскольку до сих пор род занятий наследовался в соответствии с системой гильдий. В 1791 г. был провозглашен «Манифест о свободе труда», по которому система гильдий была официально упразднена; это вызвало такой же общественный энтузиазм, как и провозглашение «Декларации» 1789 г. Широкая общественная поддержка «Манифеста» во многом способствовала укреплению неустойчивого режима Директории и продолжению революционных преобразований в стране, окруженной врагами. Такой успех был равнозначен формированию нескольких вооруженных дивизий.

Правительство, стремясь повысить свою популярность, устраивало множество массовых празднеств; в Париже эти празднества происходили на Марсовом поле, перед зданием бывшей военной школы. Прежде здесь учили королевских солдат стрелять в народ, теперь этот народ охотно собирался сюда, попирая ногами бывший королевский плац. Поэтому именно Марсово поле стало популярным местом народных празднеств и гуляний. Правительство Директории, не забывшее восторженного одобрения «Манифеста о свободе труда», решило организовать торжество в память о его провозглашении. Празднование освобождения народа от политического гнета объединялось с празднованием освобождения промышленности от сковывавшего ее развитие гнета гильдий; так массовое народное празднество должно было соединиться с промышленной выставкой. Подобное соединение представлялось вполне естественным и организаторам торжеств и публике той эпохи. К тому же среди членов парламента и правительства было немало промышленников, изобретателей и ученых, в том числе Монгольфье — директор известной бумажной компании и изобретатель воздушного шара, механик Жаккар — изобретатель названного его именем ткацкого станка, и др.

Так, в 1798 г., на заре современной индустрии, делавшей тогда первые шаги от ручной мануфактуры к машинному производству,

в Париже была открыта первая «Выставка изделий французской промышленности». Выставка была своеобразным сочетанием традиционной ярмарки и музея. Французское название ярмарки — la foire — возникло еще во времена Каролингов, от латинского слова *feriam*, что означает нерабочий день, праздник. В старину торговые ярмарки устраивались церквями или монастырями в дни святых и были одновременно яркими народными и религиозными празднествами. Музеи в эпоху Республики открывались во дворцах, принадлежащих бывшей знати, где прежде избранные посетители любовались произведениями искусства, проходя из зала в зал по строго определенному маршруту. На парижской выставке 1798 г. оказались соединенными праздничная атмосфера ярмарочного гулянья с характерными для музеев того времени формой показа экспонатов и четким маршрутом движения посетителей.

На выставке были представлены некоторые произведения искусства, но главным образом — предметы обихода, многие из которых были изготовлены машинным способом. Посетители с интересом осматривали экспозицию, находя в ней отражение своих настроений и надежд на будущее. Выставка имела огромный успех и с тех пор стала своего рода знаменем достижений промышленной революции. На протяжении всего XIX в. такие выставки играли чрезвычайно важную роль в развитии современной цивилизации, особенно в развитии конструкций из железа и стали.

В 1889 г. правительство Третьей республики впервые организовало в Париже Всемирную выставку, посвященную столетию Великой французской революции. Эйфель построил для нее 300-метровую башню из железа, опережая век стали, который еще не наступил. Башня явилась «гвоздем» выставки. Подобный энтузиазм всегда вызывали те выставки, на которых были показаны те или иные достижения совершенной технологии или инженерного искусства. Эта тенденция стала традицией, сохранившейся до наших дней.

То же можно сказать и о пневматических сооружениях, которые впервые появились в 1940 г.¹ Их создал Уолтер Бэрд, сотрудник Корнеллской лаборатории аэронавтики — исследовательской организации в Буффало, штат Нью-Йорк. Сначала они использовались в качестве укрытий радиолокаторов американских Военно-воздушных сил. В 1958 г. пневматическое сооружение было показано европейской публике на Всемирной выставке в Брюсселе в качестве павильона американской авиационной компании (ПАНАМ). Оно было спроектировано и возведено фирмой «Бэрдэйр».

Павильон представлял собой простой воздухоопорный купол в три четверти сферы и изображал глобус с нанесенными на нем воздушными линиями ПАНАМ. Он был окружен железобетонной смотровой галереей.

¹ Автор ошибается. Первое пневматическое сооружение появилось в 1948 г. (Прим. ред.).

Я осмотрел купол с галереи, но, к сожалению, не вошел внутрь. Было слишком много других павильонов, более привлекательных, нежели простая сфера, и трудно было представить себе, что пройдет немного времени, и я буду работать над подобной конструкцией.

В 60-е годы в США и Европе на менее крупных выставках было показано много пневматических сооружений, однако даже самые большие из них не превосходили павильон «ПАНАМ» — простое воздухоопорное сооружение из ткани.

Еще через три года фирма «Бэрдэйр», располагая достаточным опытом, изготовила много выставочных павильонов в США, почти монополизировав американский рынок. В это же время целую эпоху в этой области сделал двумя своими работами архитектор Виктор Ланди.

Павильон «Атомы для мира» (рис. 1) был предназначен для передвижной выставки Американской комиссии по атомной энергии и прошел по странам Центральной и Южной Америки. Оболочка павильона представляла собой две мембраны, отстоящие друг от друга на 1,2 м; межоболочечное пространство было разделено на несколько отсеков. Длина сооружения равнялась 100 м, ширина 40 м, высота 18 м. Оболочка покрывала площадь 2000 м². Масса наружной оболочки не превышала 6000 кг. Возведение ее выполнялось бригадой 12 чел. и длилось от 3 до 4 дней [1].

По общему признанию, «ярмарочные» сооружения создают атмосферу карнавала, однако, как сказал Ланди, его «абстрактные воздушные цветы» для ресторанов Брасс-Рэйл (рис. 2) на Нью-Йоркской ярмарке 1963—1964 гг. демонстрировали призыв к воображению, для чего они и были сделаны. Созданные специально для ярмарки, эти пневматические конструкции были выполнены из стекловолнистой ткани и поддерживались непрерывно подаваемым воздухом при низком избыточном давлении. Они имели высоту 22,5 и диаметр около 18 м. Эти громадные объемы, прикрепленные к центральной стойке, действительно образовывали большую трехмерную крышу, парящую над закусочными столиками.

Я думаю, это демонстрирует возможности, предоставляемые техникой XX в., создавать крупные архитектурные формы и объемы, пользуясь сравнительно простыми и недорогими средствами [2].

Крупнейшим событием, последовавшим за Нью-Йоркской ярмаркой, была Всемирная выставка в Монреале в 1967 г. Интересно, что на ней не было ни одного пневматического сооружения, и наибольшим успехом пользовался павильон ФРГ, который создали Р. Гутброд, Ф. Отто, Ф. Леонгардт, Г. Кендель, Г. Кис Медлин. Это была тентовая конструкция нерегулярного плана, состоящая из тросовых сетей и мембран, опертая в середине на стойки.

Там же находился американский павильон Бакминстера Фуллера в виде геодезического купола диаметром 50 м, но произвольно спланированный тент Фрея Отто восхищал сильнее своими более органичными, точно рассчитанными формами. На монреальской



Рис. 1. Павильон «Атомы для мира». Архит.: Виктор А. Ланди. Расчет конструкций: Северуд, Эльстед, Крюгер и фирма «Бэрдэйр». Изготовитель: фирма «Бэрдэйр»

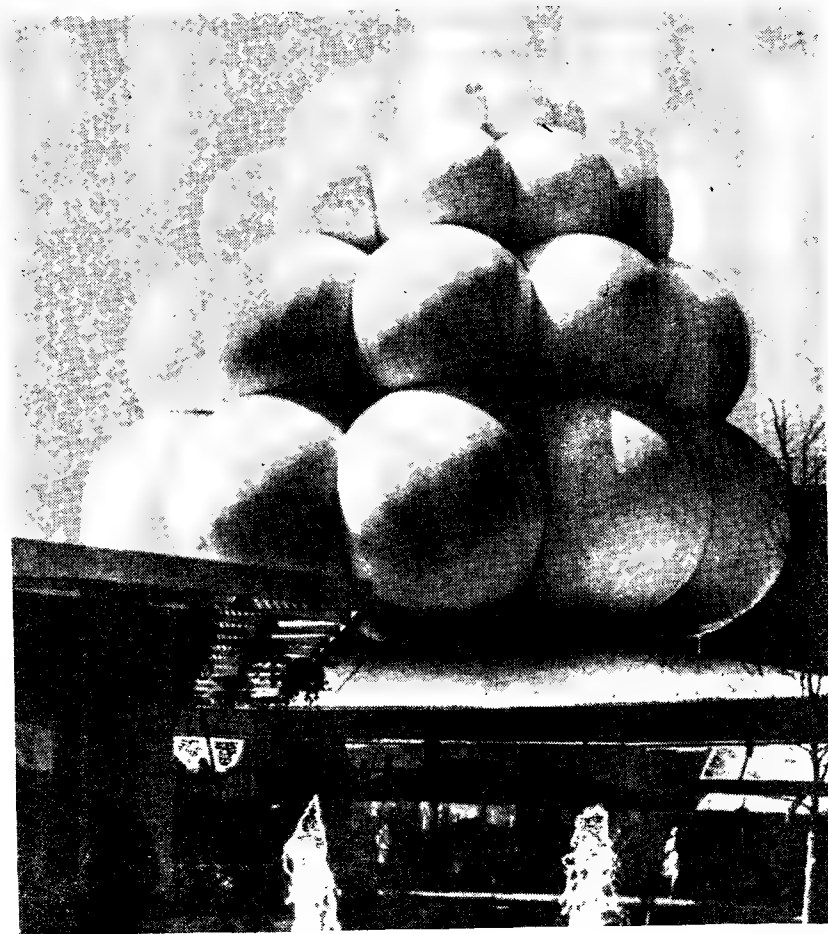


Рис. 2. Рестораны Брасс-Рэйл на Всемирной ярмарке в Нью-Йорке 1963—1964 гг. Архит.: Виктор А. Ланди. Расчет конструкций: Северуд, Эльстед, Крюгер и фирма «Бэрдэйр». Изготовитель: фирма «Бэрдэйр»

выставке было много тентовых павильонов, и ее можно было бы назвать «ЭКСПО тентовых конструкций». Выставки всегда очень чутко отражали уровень цивилизации каждой эпохи, традиционно искали новинки технологии и инженерного искусства, каждый раз разгоралось острое международное соперничество, и в Монреале геодезический купол затмили многочисленные тенты.

Развитие модернистской предвоенной архитектуры в Европе в значительной степени стимулировалось выставками. И «Баухауз», и Ле Корбюзье принимали активное участие в европейских выставках.

Всемирная выставка 1970 г. в Осаке (Япония) ЭКСПО-70 после монреальской «тентовой выставки» 1967 г. выглядела «выставкой пневматических сооружений». Наряду с мегаструктурой японского архитектора К. Танге в виде пространственных рам, некоторыми висячими конструкциями, «деревом огней» и т. п. было использовано много пневматических сооружений, более совершенных, чем на выставке 1963—1964 гг. в Нью-Йорке. Следует упомянуть ряд проектов, оставшихся нереализованными. Я помню сильное увлечение того времени пневматическими конструкциями. Как я и предвидел, ЭКСПО-70 оказалась ареной международного соперничества в области пневматической архитектуры. Это объясняется замечательной особенностью выставок — традицией предоставлять возможности новым направлениям развития и давать им официальное признание.

Павильон Франции для ЭКСПО-70 в Осаке (конкурсный проект). Авторы: Жан ле Куто и Дени Слоан (1967).

Бетонные оболочки, заглубленные в грунт, имели наземное продолжение в виде пневматических оболочек, образовавших вместе с ними полные сферы. Внутри предусматривались многоярусные стальные платформы. Эти платформы нигде не касались оболочек. Проект не был реализован прежде всего из-за чувства неуверенности в решении технической задачи [1].

Павильон Италии для ЭКСПО-70 в Осаке (конкурсный проект). Автор: Студия архитектуры и промышленного дизайна (1968).

Проект представляет дальнейшее развитие структурной системы. В нем предложена большая оболочка, состоящая из куполообразных мембранных секций, которые скомплектованы в виде модульной конструкции. Сферические сегменты высотой 17 м со стороной 24 м должны были выполняться из поливинилхлорида с помощью высокочастотной сварки. Они перекрывали площадь 3850 м². Внутреннее давление воздуха составляло 200 Па. Требовались два месяца на изготовление оболочек и неделя на их монтаж [1].

Павильон ФРГ для ЭКСПО-70 в Осаке (конкурсный проект). Авторы: Вольфганг Ратке и Эйке Виз (1968).

Из пояснительной записки архитекторов: «Проект, в соответствии с пожеланиями конкурсной комиссии, представляет интеграцию здания и выставки, достигнутую путем использования многих возможностей в запрограммированной игре структуры, пространства, света и тени. Похожие на облака формообразования из по-

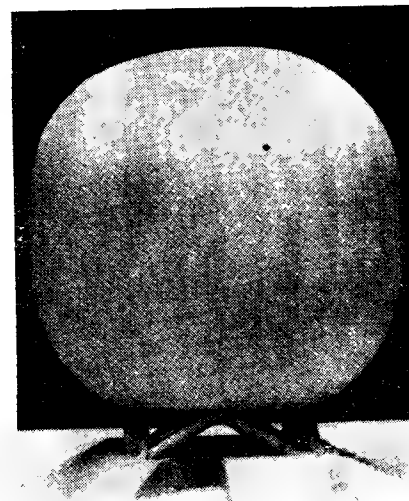
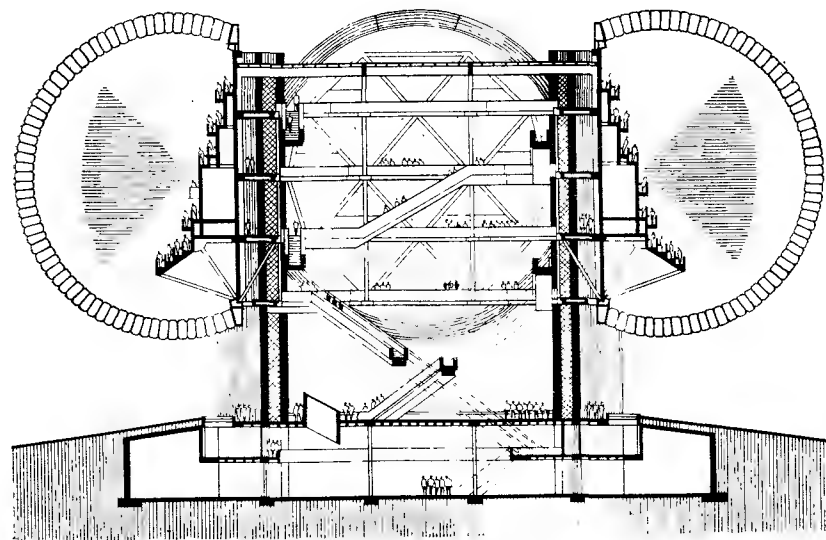


Рис. 3. Павильон США для ЭКСПО-70. Первоначальный проект, 1968 г. Авторы: Дэвис, Броуди, Чермаев, Гейсмар, Де Харак.

Рис. 4. Павильон США для ЭКСПО-70. Второй проект



ливинилхлоридных баллонов могут быть сделаны из прозрачных, просвечивающих и цветных материалов, которые меняют свой вид при использовании световых эффектов» [1].

Первоначальные проекты павильона США для ЭКСПО-70 в Осаке (рис. 3 и 4). Авторы: Дэвис, Броуди, Чермаев, Гейсмар, Де Харак (1968).

Первый проект этих авторов (двухслойная оболочка кубической формы¹, собранная из синклластических панелей) оказался победителем на конкурсе проектов павильона США. Однако ни первый, ни второй проекты не были осуществлены по финансовым причинам (конгресс сократил бюджет с 16 до 10 млн. долларов, из которых только 4 млн. приходились на долю павильона и всей экспозиции). Окончательный вариант, который был реализован, выглядит значительно скромнее, но оказался вполне подходящим для того, чтобы продемонстрировать возможности пневматических конструкций.

Как и предполагалось, на территории ЭКСПО-70 оказалось много разнообразных пневматических сооружений:

- информационные киоски простой сферической формы;
- павильон Рико с привязным воздухоплавательным баллоном;
- павильон Мицуи с тремя пневматическими конструкциями;
- купола Бини-Шелл — пристройка к автомобильному павильону;
- павильон «Посетите США» в виде простого воздухоопорного купола;

- складные надувные зонтики в парке;
- надувные кровельные подушки на пространственных рамах Мегаструктуры К. Танге;

- павильон США — в то время крупнейшая в мире (проект 80 м)² воздухоопорная оболочка, усиленная сеткой из стальных канатов;
- павильон Фудзи — крупнейшая в мире (диаметр 50 м) пневмоарочная конструкция;

- плавающий театр павильона Федерации электротехнической промышленности, состоящий из довольно усложненных пневматических структур.

Уровень павильонов ЭКСПО-70 в Осаке отличался от уровня сооружений Нью-Йоркской выставки 1963—1964 гг. Они превосходили их по размерам, был виден заметный прогресс в теории, технике изготовления и проектировании. Томас Герцог так отозвался об этом в аннотации к своей книге «Пневматические конструкции»: «В течение ряда лет технология зданий из мембран и воздуха страдала от предвзятого мнения, что они пригодны лишь для реализации в виде простых куполов и сводов и обладают только ограниченными проектными и функциональными возможностями. Однако за несколько последних лет громадное число реализованных проектов и в особенности опыт возведения выдающихся сооружений на ЭКСПО-70 в Осаке, основанных на пневматическом принципе, дают убедительное доказательство обратного. Они ясно продемонстрировали, что строительная пневматика проложила дорогу для революционно новых перспектив, особенно в область дизайна и функциональности» [1].

Приведем также отзыв Роджера Дента: «Среди пневматических сооружений, появившихся на ЭКСПО-70 в Осаке, наиболее

впечатляющими и замечательными по замыслу и размерам были павильоны США и Фудзи, а также плавающий театр Федерации электротехнической промышленности. Их вклад в развитие строительной пневматики поистине огромен; никогда ранее такая изысканность и такие возможности не находили столь драматического выражения в пневматических сооружениях, как здесь» [3].

Павильон США (рис. 5 и 6). Авторы: Дэвис, Броуди, Чермаев, Гейсмар, Де Харак. Консультант по конструкциям: Д. Гейгер.

Овальный план длиной 138,6 и шириной 78 м перекрыт воздухоопорной оболочкой со стрелой подъема всего 6,1 м. Столь малый подъем стал возможным только потому, что он был подкреплен сеткой из 12 стальных тросов диаметром 48 мм. Масса тросовой сети 45 т. Оболочка, выполненная из стеклоткани, покрытой поливинилхлоридом со швами на высокочастотной сварке, весила 15 т. Внутреннее давление воздуха поддерживалось на уровне 27 мм вод. ст. (0,27 кПа) даже при сильных ветрах; при сильном снегопаде оно могло быть поднято до 63 мм вод. ст. (0,63 кПа).

Павильон был одним из крупнейших на ЭКСПО-70. Его особенность заключается не только в размерах, но и в сочетании ясности и необычности проектного решения. Здание частично заглублено. Вынутый грунт образует двускатную насыпь по периметру здания.

После ЭКСПО-70 Д. Гейгер построил ряд университетских стадионов, используя тот же самый конструктивный принцип — полагая воздухоопорная оболочка из покрытой тефлоном стеклоткани, усиленная тросовой сетью. В этом случае реализм принял вызов, брошенный высокоразвитой технологией. В самом деле результат оказался ясным и очевидным в смысле ценности проекта для выставочных целей.

Павильон Фудзи (рис. 7). Автор: Ютака Мурата. Расчет конструкций: Мамору Кавагучи.

Крупнейшее до сего времени пневмоарочное сооружение павильона Фудзи было наиболее заметным на ЭКСПО-70 и стало всемирно известным благодаря своей органичной форме.

«Это сооружение, которое представляет собой сейчас самую большую мембранную конструкцию, состоит из 16 пневмоарок диаметром 4 и длиной 78 м, расположенных по окружности диаметром 50 м. В результате оба торца здания поднялись на 7 м. Через каждые 4 м арки соединяются друг с другом охватывающими их поясами шириной 50 см. Средняя арка полуциркулярная. Остальные, по мере сближения их опор, становятся все выше и выше. В обоих торцах оставлены проемы шириной 10 м в качестве входов. Тканевая основа материала с разрывной прочностью 400 кгс/см (400 кН/м) и массой 3,5 кг/м² состоит из поливинилспиртового волокна. Наружная сторона ткани покрыта хайпалоном, внутренняя — поливинилхлоридом. Концы арок были заделаны в стальные цилиндры.

Обычно давление воздуха в арках составляло 1000 мм вод. ст. (10 кПа). Оно могло быть повышено до 2500 мм (25 кПа) при

¹ Точнее, нечто среднее между кубом и сферой (Прим. ред.).

² Точнее, 78 м (Прим. ред.).

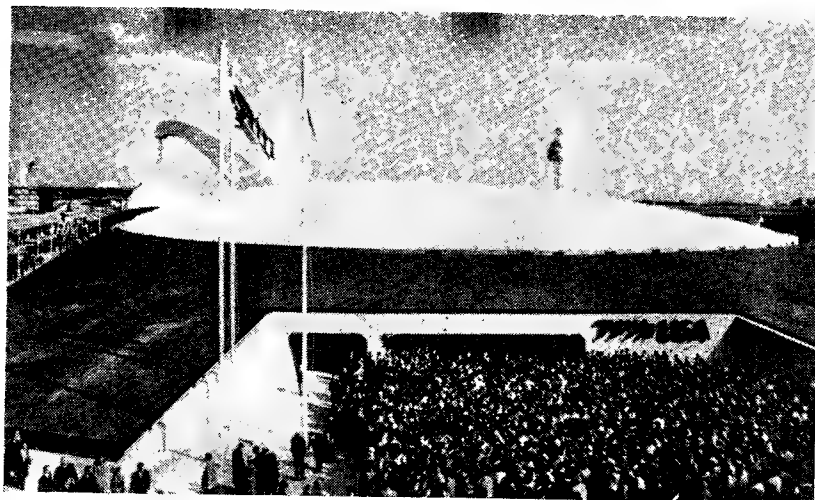


Рис. 5. Павильон США для ЭКСПО-70. Авторы: Дэвис, Броуди, Чермаев, Гейсмар, Де Харак. Конструктивный расчет: Дэвид Гейгер

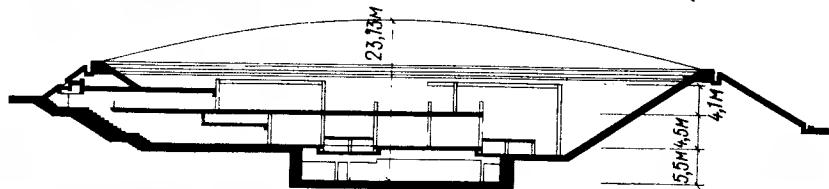


Рис. 6. Павильон США (разрез)

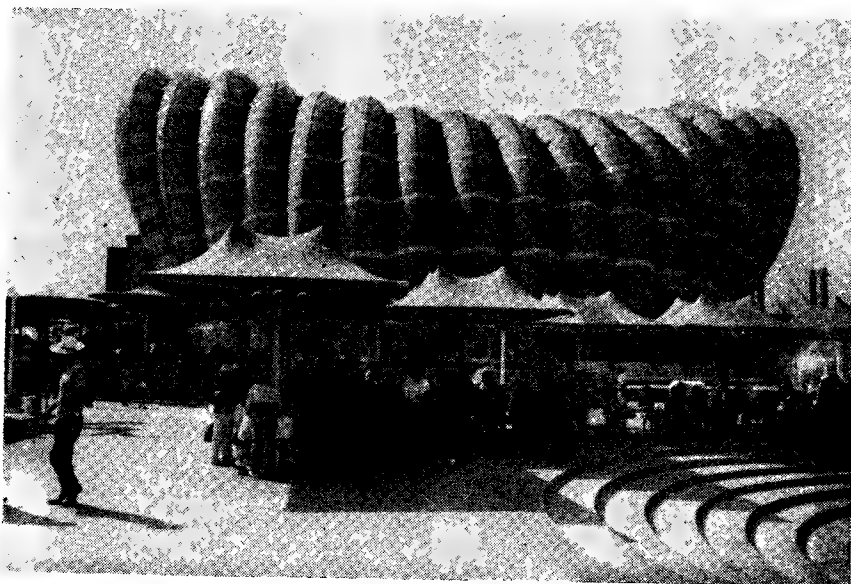


Рис. 7. Павильон Фудзи на ЭКСПО-70 в Осаке

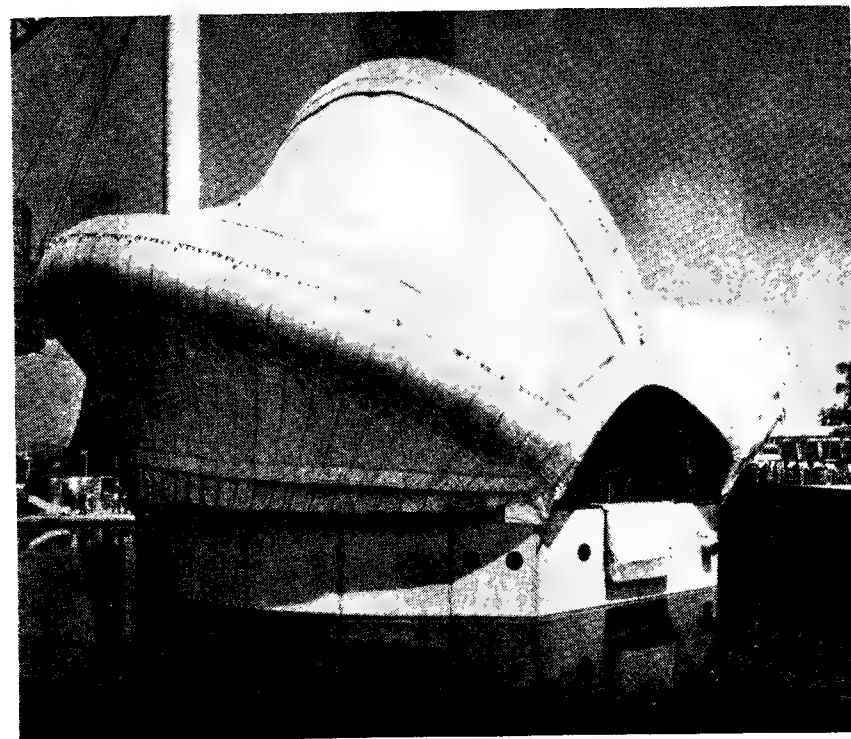


Рис. 8. Пневматический плавучий театр на ЭКСПО-70 в Осаке

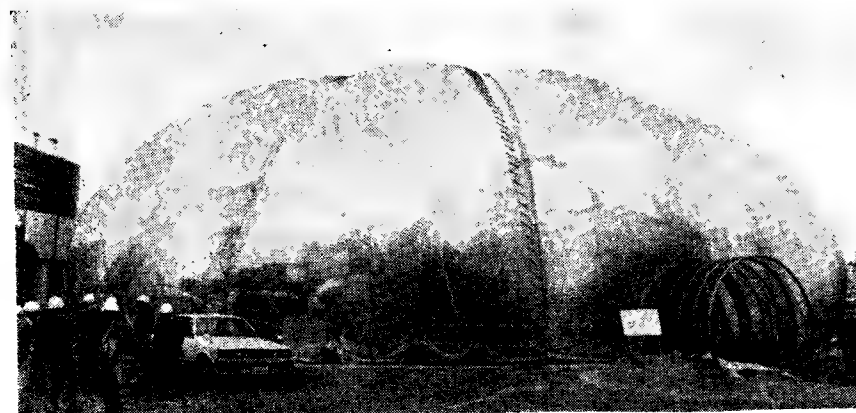


Рис. 9. Павильон Фуё на ЭКСПО-81 в Кобе, Япония

штормовых ветрах. Все арки были присоединены к центральному турбокомпрессору с помощью периметральной системы стальных труб. Компрессор оказался весьма эффективным и работал исправно даже при сильном ветре» [1].

Пневматические арки использовались и ранее, но обычно диаметр их сечения не превышал 1 м, внутреннее давление — 1 ати (100 кПа), а пролет — 10 м. В павильоне Фудзи общая поверхность арок при постоянной длине не зависела от их диаметра. Поэтому можно было увеличить диаметр сечения арок с тем, чтобы уменьшить внутреннее давление в них, что в конечном счете выразилось в снижении растягивающих усилий в оболочке. Это было экономичным путем, позволившим установить пневмоарочные конструкции пролетов 50 м для ЭКСПО-70.

Пневматический плавучий театр-павильон Федерации электротехнической промышленности (рис. 8). Автор: Ютака Мурата. Конструктивные расчеты: Мамору Кавагучи.

Театр был установлен на стальной опорной раме диаметром 23 м, на которой располагались артистические уборные, подсобные помещения и машинный зал. Он плавал в неглубоком озере и его поддерживали 48 понтонов. Объем воздуха в каждом баллоне автоматически регулировался в зависимости от перемещения зрителей или изменения ветра. В течение 20-минутного представления плавучая конструкция, медленно вращаясь, пересекала озеро.

Театр был покрыт оболочкой, поддерживаемой пневматическими трубами с диаметром сечения 3 м, образующими три арки пролетом 23 м. Внутреннее давление могло колебаться в пределах 15—30 кПа в зависимости от силы ветра. Не связанный с верхней оболочкой потолок был выполнен в виде мембраны с канатами. Обе оболочки, кровельная и потолочная, были герметично прикреплены по периферии аудитории, и пространство между оболочками находилось под отрицательным давлением (вакуумом) 0,1 кПа, которое можно довести до 0,2 кПа в штормовых условиях, чтобы предотвратить флаттер (полоскание) оболочки. Светильники и громкоговорители были подвешены к нижней оболочке.

Позади сидений вдоль кромки обеих оболочек шла стальная труба, оба конца которой были прикреплены к полу на петлях. Эта трубчатая арка удерживалась на месте канатной тягой, которая реагировала на отрицательное давление. Когда оно уменьшалось, арка поднималась и открывала широкий входной проем для посетителей. По обе стороны плавучего театра имелись надувные лестничные ступеньки, соединенные с запасным выходом.

Малые размеры сооружения обусловили большую свободу проектирования. Этот павильон оказался «наиболее хитроумным из всех пневматических сооружений, когда-либо построенных» [3]¹.

Архитектор Р. Дент в своей книге «Принципы пневматической архитектуры» [3] отметил, что ЭКСПО-70 была «ЭКСПО-пнеumo».

¹ За этот проект японское Министерство науки и техники присудило Ю. Мурате специальную медаль (Прим. ред.).

После ЭКСПО-70 пневматические сооружения стали обычными, пора энтузиазма миновала, но их высокая конструктивная эффективность оставалась очевидной, даже после того как они перестали быть «криком моды».

Они являются наиболее экономичными сооружениями с колоссальными возможностями мегаструктуры. Их размеры превышают обычные размеры зданий, они могут перекрывать агломерации зданий. Например, вся выставка может быть покрыта единой пневматической кровлей.

Существует проблема, которую еще надо решать. Воздухоопорное здание является своего рода теплицей, которая аккумулирует солнечную энергию. Зимой тепличный эффект полезен, но в солнечные летние дни он недопустим, и помещение нуждается в усиленной вентиляции или кондиционировании воздуха. Однако обычные методы для воздухоопорных зданий неприменимы. Регулирование влаготермического режима представляет собой наиболее серьезную проблему после проблем статики.

Павильон Фуё в Кобе, Япония (рис. 9). Автор проекта: Ю. Мурата. Конструктивные расчеты: Мамору Кавагучи. Механические расчеты Уичи Иноуэ. Гидропоника: Кунихико Мураи (1981).

Павильон представляет собой воздухоопорный купол диаметром 36 м из пленки и сетки, усиленный канатами. Под ним расположены четыре геодезических купола диаметром по 14 м каждый, покрытых сеткой и пленкой, в которых находятся экспонаты и размещается администрация. Пространства под этими малыми куполами соединены между собой и с внешней средой, так что давление воздуха под куполами такое же, как и снаружи, т. е. атмосферное. Давление воздуха между четырьмя куполами и внешней оболочкой обычно равно 30 мм вод. ст. (0,3 кПа), но может быть повышено до 100 мм вод. ст. (1 кПа), чтобы противостоять ураганным ветрам, имеющим скорость 40 м/с.

Климат, создаваемый под малыми куполами, рассчитан на пребывание в них человека, а под большим куполом — на выращивание растений. Соответственно, павильон имеет два кондиционера — обычный для людей и специальный для растений.

Воздух, поддерживающий большой купол, проходит через водораспыляющую камеру, охлаждается при испарении распыленной воды и поступает в помещение вместе с парами воды. Подогретый солнцем воздух поднимается и аккумулируется в верхней части купола, где установлены вытяжные воздухопроводы, отводящие тепло и пар.

На пленках малых куполов выращивают водяной кресс, который растет на полосках синтетического войлока, орошаемых с помощью спринклеров удобрением раствором. Таким образом, четыре малых купола в нужное время покроются зеленью.

Полы в пределах между большим и малыми куполами представляют собой мелкие бассейны с удобрением раствором, где плавают перфорированные тарелки, предназначенные для растений. Снаружи павильона и изнутри сквозь пленку будут видны густые заросли, скрывающие посетителей.

Павильон демонстрирует новый конструктивный метод, новую систему кондиционирования и успехи гидропоники. Это новый принцип организации среды.

Пневматические сооружения сейчас используются для выставочных павильонов так же, как стальные в прошлом столетии, и они будут развиваться от выставки к выставке.

Архитекторы вступили на этот путь, и сейчас пневматические конструкции играют важную роль. Открываются ясные перспективы пневматической архитектуры и ожидаются ее большие успехи. Она еще долгое время будет основой выставочных павильонов, и область ее применения расширится от простых зданий до среды обитания человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herzog T. Pneumatic Structures. London, 1977.
2. Lundy V. Architectural and sculptural aspects of pneumatic structures. — Proceedings of the 1st International Colloquium on pneumatic structures. Stuttgart, 1967.
3. Dent R. N. Principles of pneumatic architecture. London, 1971.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАСЕЙНАХ И СООРУЖЕНИЯХ ДЛЯ СПОРТА И ОТДЫХА

И. Линекер (Австрия)

Развитие системы воздухоопорных зданий «Лин» началось около 12 лет назад с детального анализа основных тенденций в строительстве плавательных бассейнов и других сооружений для отдыха. При этом на первых порах даже не возникала задача создать для такого рода сооружений эстетичные пневматические конструкции из тканей; речь шла лишь о попытках сократить затраты на строительство и энергоснабжение этих сооружений и одновременно повысить их посещаемость.

В свое время заказчики при проектировании и строительстве общественных крытых плавательных бассейнов исходили из того, что время пользования бассейном не должно превышать 1—2 ч. Бассейны обычно оборудовали автоматическими моментными контрольно-пропускными устройствами, которые впускают посетителей при получении входной платы, а в случае их пребывания в бассейне сверх установленного времени блокируют выход до тех пор, пока не будет выплачена рассчитанная автоматом «штрафная» сумма. При этом бассейны редко собирали полное число посетителей, а то и вообще пустовали. Подобный порочный в социально-психологическом отношении подход к эксплуатации бассейнов

проявлялся также и во всей их внутренней обстановке. Неудивительно, что владельцам бассейнов приходилось терпеть убытки из-за их плохой посещаемости. Посетители здесь не чувствовали себя свободно и избегали часто пользоваться бассейном, между тем как именно обслуживание большого числа постоянных клиентов позволяет окупать высокие эксплуатационные расходы.

Анализ сложившейся ситуации позволил сделать следующие выводы. Существует общая тенденция к сокращению рабочего времени и увеличению доли свободного времени, используемого для отдыха; в западноевропейских странах это время составляет уже около 125 дней в году. Поэтому и время пользования бассейнами должно увеличиться и стать по возможности неограниченным. Для этого необходимо расширять площади предназначенных для отдыха помещений при бассейнах, что, в свою очередь, требует увеличения пролетов зданий.

При использовании традиционных «тяжелых» конструкций увеличение пролетов связано с резким ростом капитальных затрат, тогда как воздухоопорные сооружения в принципе представляют собой именно такие системы, которые позволяют наиболее экономично перекрывать большие пролеты.

На основании изложенного были сформулированы основные требования к сооружениям общественных плавательных бассейнов: применение экономичных воздухоопорных конструкций с большими пролетами;

использование большепролетных объемов для гибких и рациональных планировочных решений с применением легких встроенных помещений;

унификация конструктивных элементов покрытий, окон и стен; обеспечение многообразия форм сооружений различной высоты;

возможность свободного расширения и достройки сооружений; сокращение затрат на инженерное проектирование путем повторного применения унифицированных элементов;

применение ЭВМ для статических расчетов и рационального раскрытия пневматических оболочек на основе универсальных программ.

Энергетические проблемы. В начальный период развития пневматических сооружений нефть, являющаяся основным источником энергии, была настолько дешевой, что заботиться о сокращении энергетических затрат было даже вряд ли экономически выгодно.

Удаление избыточной влаги из помещений бассейнов осуществляется путем засасывания, нагревания и нагнетания в помещения наружного воздуха, который затем кратчайшим путем вновь выбрасывается в атмосферу. При этом бесполезно расходуется большое количество энергии, в особенности затрачиваемой на испарение воды с зеркала бассейна. Вода из душей, имеющая температуру около 30 °С, сбрасывается в канализацию, так же как и вода из переливных резервуаров.

В бассейнах круглосуточно работает отопление, поддерживая постоянную температуру, тогда как посетители находятся там в общей сложности не более 40 % всего времени в году. Это связано в основном с тем, что традиционные тяжелые конструкции за ночь сильно остывают, и необходимая «комфортная» температура на их поверхности вновь устанавливается только при интенсивном отоплении.

Сложной является и проблема вентиляции больших помещений. При этом нужны значительные скорости движения воздуха, что легко может привести к сквознякам, весьма чувствительным для пользующихся бассейном посетителей.

Однослойные воздухоопорные оболочки неудовлетворительны в отношении теплообмена. В зимнее время они имеют большие теплопотери, сопровождающиеся обильным образованием конденсата, летом же создают «парниковый» климат, требующий интенсивного кондиционирования воздуха. В помещениях, перекрытых такими оболочками, скорость движения воздуха, как правило, велика. Поэтому при проектировании воздухоопорных покрытий бассейнов необходимо выполнять следующие требования.

Сопротивление оболочки паропроонианию должно уменьшаться в направлении изнутри наружу. Следует обеспечить возможность проветривания и осушения всех воздушных полостей в покрытии и тем самым сохранение его изолирующих свойств. Дополнительные изолирующие слои покрытия нужно сделать по возможности такими же гибкими, как и несущая оболочка, чтобы сократить расходы на монтаж. Необходимое для стабильности оболочки избыточное внутреннее давление воздуха должно использоваться одновременно для обеспечения комфортных климатических условий в помещении, создания необходимого воздухообмена и извлечения энергии, а также для сокращения расходов на оборудование.

Социально-психологические проблемы. Непременным условием окупаемости эксплуатационных затрат является высокий уровень посещаемости бассейнов; поэтому решающее значение имеет создание необходимого комфорта для посетителей. Как для длительного летнего отдыха важна смена климатических условий, так нельзя недооценивать ее значение и для кратковременного отдыха в вечернее время или в выходные дни.

Тяжелые, не пропускающие свет традиционные конструкции покрытий всей своей массой давят на помещения; это давление ощущают, сознательно или бессознательно, и находящиеся там люди. В таких условиях человеку трудно расслабиться и освободиться от тяжести повседневных забот. Со всех сторон его обступают прямые линии, углы и плоскости, жесткие и противоестественные. Не смягчают общей атмосферы и высокие остекленные стены. Чересчур яркое освещение и резкие световые контрасты утомляют зрение. Округлые формы мягче, приятнее для глаз и поэтому предпочтительнее, но при традиционных тяжелых конструкциях они оказываются чересчур дорогостоящими.

Тканевые конструкции покрытий пропускают свет, что подчеркивает их легкость, зрительно снимает тяжесть с помещений и находящихся в них людей. Тем самым обеспечиваются нужные людям расслабление и ощущение полноценного отдыха, в особенности при использовании надлежащей цветовой гаммы; оптимальный психологический эффект создают оранжевые тона.

В помещениях без окон, без зрительного контакта с внешним миром человек быстро утомляется. Поэтому обычные «глухие» воздухоопорные оболочки здесь непригодны; в помещении нужны окна, хотя и не слишком большие.

Таким образом, при проектировании воздухоопорных покрытий бассейнов и аналогичных сооружений необходимо:

- обеспечить светопроницаемость оболочки;
- использовать возможности цветовых решений, особенно в сочетании со светопроницаемостью;

- предусмотреть применение крупноразмерных оконных блоков.

Конструктивная система. Разработанная автором система представляет собой воздухоопорную мембранную конструкцию, расчлененную тросами. Она состоит из полуovalных оконных и стеновых элементов, диагонально расположенных разгружающих тросов и натянутой между ними оболочки. В промежутках между оконными и стеновыми элементами оболочка крепится к грунту или к фундаменту. Тросы также крепятся непосредственно к фундаменту таким образом, чтобы опрокидывающие моменты от усилий в тросах были минимальны.

Расположенный по периметру сооружения фундамент, служащий опорой для оконных и стеновых элементов, может быть также совмещен с каналом приточно-вытяжной вентиляции. Фундамент должен, кроме того, воспринимать усилия, передаваемые тросами. Нагрузка от фундамента на грунт незначительна, поэтому сооружения можно возводить и на слабых грунтах.

Тканевая оболочка покрытия натягивается между диагонально расположенными разгружающими тросами, поэтому независимо от размеров покрытий для них можно почти во всех случаях использовать ткань одной и той же прочности. Основные усилия в системе покрытия воспринимаются тросами.

Схемы планов (рис. 1). Самое малое из сооружений, включающее три полуovalных оконных или стеновых элемента с натянутыми между ними тросами и оболочкой, имеет в плане форму равностороннего треугольника. Сооружение может включать 4, 5, 6, 7, 8 и более оконных (стеновых) элементов, расположенных по периметру правильного многоугольника. На каждой стороне такого многоугольника могут размещаться один, два, три и более окон-

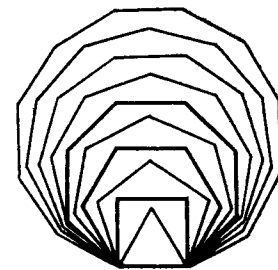


Рис. 1. Варианты форм плана и размеров сооружений с ограждающими элементами одного размера

ных элемента. Многие из этих исходных форм могут быть сблокированы, образуя сооружения сложного очертания в плане; для блокировки наиболее удобным является восьмиугольный план.

Тканевая оболочка. Несущим является наружный слой оболочки; полотнища ткани в нем располагаются поперек диагональных разгружающих тросов. К наружному слою в отдельных точках подвешивают промежуточные слои оболочки и внутренний экран. Крепление наружного слоя оболочки к оконным и стеновым элементам осуществляют с помощью пропущенных сквозь петли тросов, закладываемых в специальные пазы и снабженных на концах натяжными винтами. Аналогичным образом крепят к этим элементам промежуточные слои оболочки и внутренний экран. Диагональные разгружающие тросы закрепляют в фундаменте с помощью анкерных плит, а в вершинах оболочек крепят посредством запрессованных наконечников с резьбой к узловым пластинам. По длине тросы пропускают через петли, прикрепленные к оболочке.

Подвески для крепления внутреннего экрана к наружному слою оболочки, расположенные в вершинах треугольной сетки, рассчитаны в основном на растяжение, но могут воспринимать и небольшие сжимающие усилия. Таким образом, исключается возможность появления в наружном слое не предусмотренных расчетом случайных усилий. Внутренний экран выкраивают с таким запасом, чтобы даже при максимальном давлении под оболочкой и отсосе, создаваемом ураганым ветром, материал экрана оставался ненапряженным. Кроме того, устройство гибких подвесок исключает возникновение в оболочке дополнительных усилий от возможных неточностей раскроя и монтажа. Промежуточные слои оболочки также выкраивают с запасом, чтобы исключить их взаимное соприкосновение при практически возможных неточностях монтажа и тем самым обеспечить максимальное термическое сопротивление покрытия.

Подвески состоят из крюка, приваренного к наружному слою оболочки, такого же крюка с распределительной шайбой на внутреннем экране и соединяющего их шнура с петлями на концах. На шнур насажены цилиндрические бобышки из эластичного пенопласта с замкнутыми ячейками; высота бобышек принята равной расстоянию между слоями оболочки с учетом 20 %-ного обжатия. Благодаря обжатию пенопласта исключается проникание водяных паров сквозь отверстия в промежуточных слоях в местах пропуска подвесок, причем кромки отверстий дополнительно усиливают специальными шайбами во избежание их «разработки».

С помощью специально сконструированного приспособления можно заранее собрать сегменты внутреннего экрана и промежуточных слоев оболочки, доставить их к месту монтажа в рулонах и за один прием подвесить к наружному слою оболочки. По линиям стыков сегментов (в ендовах) выполняют разъемные соединения внутреннего экрана и отдельно промежуточных слоев оболочки с помощью специальных зажимных профилей из прозрач-

ной пластмассы. Поскольку оболочка подходит к ендове под переменным по ее длине углом, необходимо особенно точно выдерживать линию установки стыковых профилей, чтобы и в месте стыка обеспечить соблюдение расстояния между слоями с учетом практически возможных неточностей монтажа.

Номинальные расстояния между слоями пятислойной оболочки обычно принимают равными 50, 25, 25 и 50 мм. При необходимости, например для уменьшения скорости движения воздуха внутри покрытия, эти расстояния могут быть легко изменены. Вблизи нижних углов оболочки (между оконными или стеновыми элементами) расстояние между ее наружным слоем и внутренним экраном делают увеличенным, чтобы избежать слишком сильных потоков воздуха. Промежуточные слои оболочки снабжены в этих местах тканевыми клапанами, позволяющими регулировать воздухообмен между внутренней и наружной воздушными полостями покрытия. Конструктивно нижние части оболочки выполняют таким образом, чтобы исключить повреждение оболочки жесткими деталями или повреждение самих деталей при падении давления под оболочкой. Крупномасштабная модель оболочки была испытана на все возможные воздействия (в том числе монтажные); при этом были получены все необходимые данные для расчета.

Светопропускание всей конструкции непосредственно после ее возведения составляет 3—5 %, что вполне достаточно для достижения эффекта легкости и живописности покрытия. Оранжевый тон наружного слоя оболочки создает мягкую цветную подсветку всего помещения и находящихся в нем людей. Вблизи окон, где много дневного света, это цветное освещение вообще незаметно, и только в глубине помещения поток света, проникающего через покрытие, постепенно нарастает. Особенно красиво такое освещение в ненастную погоду, когда на улице дождь, туман или снегопад: покрытие излучает мягкий, приветливый свет, словно все время светит солнце.

Окна и стены. Полуovalные оконные и стеновые элементы жестко заделывают в расположенный по периметру сооружения фундамент. В построенных до сих пор сооружениях эти элементы были выполнены из железобетона. Основной нагрузкой на них является ветровой напор, воспринимаемый вертикальными стойками (оконными импостами). Горизонтальные ригели оконных элементов крепят к анкерам, выпущенным из стоек, так что площадь опирания ригеля располагается выше его нейтральной оси. Криволинейные верхние пояса собирают по длине из нескольких элементов симметричного сечения, что исключает возможность неправильной сборки. Заполнение окон делают обычно из изолирующего стекла; в нижней части окон несколькими болтами крепят подоконники из асбестоцементных плит типа «этернит». Аналогично устанавливают вращающиеся двери в проемах между стойками дверных элементов. В целом оконные элементы запроектированы таким образом, что в любое время сооружение может быть расширено путем пристройки новых секций с любой стороны, без раз-

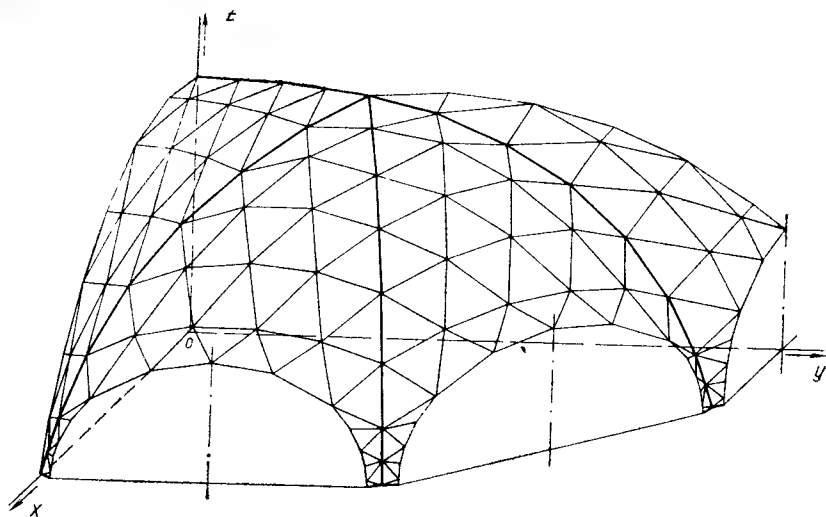


Рис. 2. Разбиение оболочки покрытия на конечные элементы

борки уже существующих конструкций; если необходимо, остекление заменяют на двери. Замена остекления может быть произведена спаружи, без прекращения эксплуатации сооружения.

В сооружениях большой высоты, например оборудованных трибунами, оконные элементы устанавливают в верхней части стен, причем их несущие элементы наращивают снизу. В этом случае вентиляционный канал служит в качестве распределительной ветровой балки, для чего на участках между элементами предусматривают необходимые по расчету опоры.

Форма и размеры оконных элементов могут быть различными; для бассейнов и спортивных залов оптимальная их ширина составляет 12,5 м.

Статика и раскрой оболочек. Статический расчет оболочек производится на основе метода конечных элементов с использованием специально разработанной программы для ЭВМ (рис. 2). При этом возможен учет всех характеристик материалов, существенных для обеспечения прочности и устойчивости оболочки. Программа позволяет также учесть все распределенные и сосредоточенные нагрузки, приложенные в любом месте оболочки. Предусмотрены различные варианты формы и размеров оконных элементов, а также их взаимного расположения. ЭВМ путем итераций оптимизирует предварительно заданную форму оболочки и рассчитывает напряжения в тканевой мембране и усилия в тросах. На следующем этапе ЭВМ рассчитывает раскрой полотнищ несущей оболочки при заданной их максимальной ширине. Полотнища выкраивают таким образом, что примыкание оболочки к оконным элементам и стыковка рядовых сегментов осуществляются точно по линиям контура и ендов, так что отходы ткани сведены к минимуму.

Далее происходит расчет раскроя внутреннего экрана оболочки. Полотнища экрана выкраивают таким образом, чтобы в проектном положении оболочки швы наружной мембраны и экрана располагались взаимно перпендикулярно. В программу расчета введено условие, чтобы даже при максимальном давлении под оболочкой и отсосе, вызываемом ураганным ветром, напряжения в экране не возникали, что исключает также появление не предусмотренных расчетом усилий в несущей мембране и в подвесках.

При расчете раскроя промежуточных слоев оболочки исключается возможность их соприкосновения. Учитываются также практически возможные неточности монтажа. Наконец, ЭВМ рассчитывает расстановку подвесок, которые должны быть перпендикулярны к наружному слою оболочки и к внутреннему экрану.

ЭВМ выдает результаты расчетов раскроя оболочки в виде чертежей в масштабе 1:50 с указанием координат всех узловых точек (рис. 3). Многократная проверка разработанной программы расчета показала ее высокую эффективность.

Раскрой полотнищ выполняется с точностью до 1 мм. Одновременно рассчитываются пространственные координаты узловых точек раскроя и радиусы кривизны швов, а также площади поверхности отдельных полотнищ и сегментов оболочки и объем помещения под оболочкой.

Изготовление и монтаж оболочек. В заводских условиях выполняется укрупнительная сборка сегментов несущей наружной мембраны покрытия (с приваренными к ней деталями для крепления подвесок) до максимальных размеров, возможных по условиям транспортирования. Перед началом монтажа эти укрупненные полотнища раскладывают на полу и соединяют зажимными стыковыми пластинами. Затем края мембраны натягивают по криволинейным верхним поясам оконных элементов, чтобы впоследствии она была полностью натянута подшитыми к ней разгружающими grosami. Для подъема мембраны примерно до уровня карниза целесообразнее всего использовать небольшие надувные мешки, которые укладывают на полу до раскладки мембраны, а затем наполняют воздухом от небольшого компрессора. Другие подъемные средства при монтаже не требуются.

Для удобства подвешивания внутренних слоев оболочки наружная мембрана опускается на высоту, удобную для работы с уровнем пола, для чего избыточное давление воздуха соответственно снижается. Только для работы вблизи оконных элементов необходимы легкие передвижные подмости. Поскольку внутренний экран и промежуточные слои оболочки так же гибки, как и наружная мембрана, для их монтажа не требуется лесов, которые обычно бывают необходимы для установок жестких элементов изоляции. В конце монтажа отдельные сегменты каждого из внутренних слоев оболочки стыкуются между собой по линиям ендов с помощью специальных пластмассовых профилей, образующих разъёмные соединения.

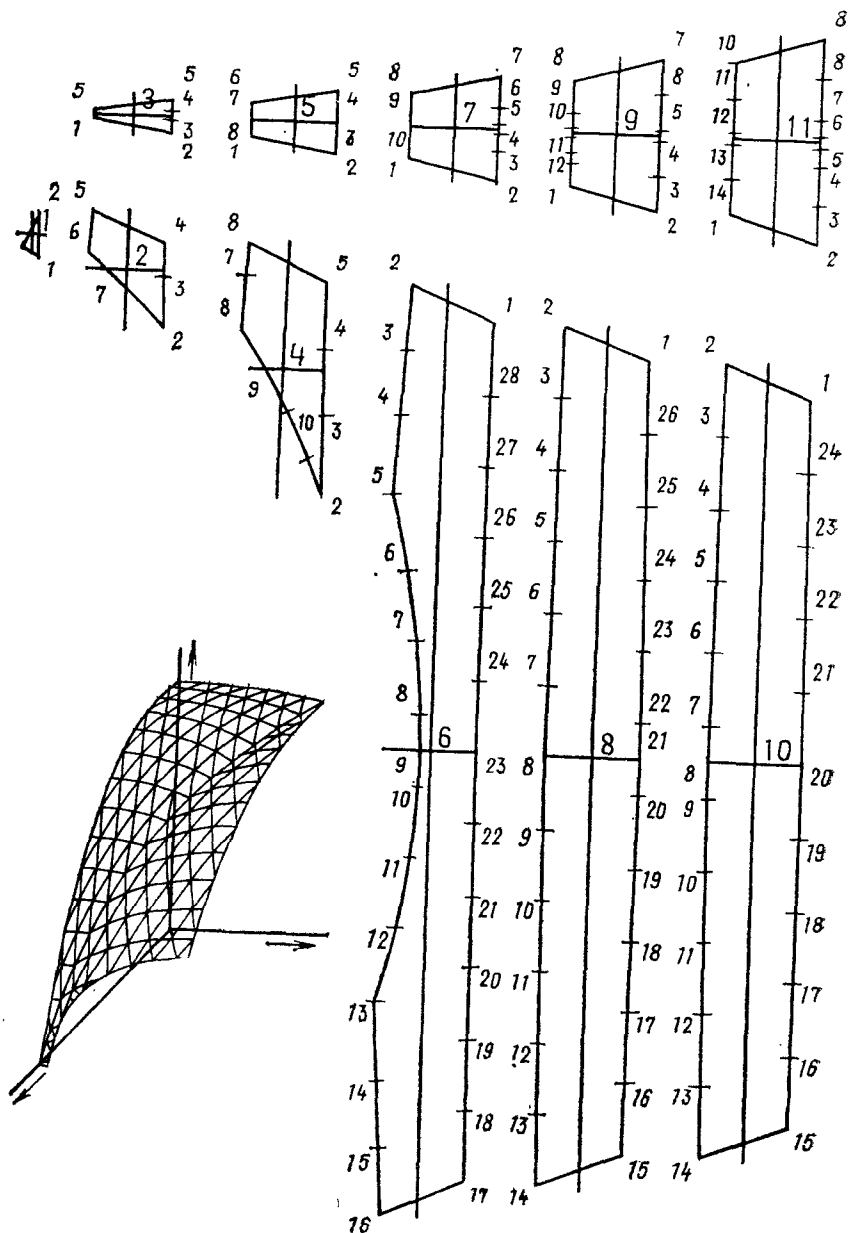


Рис. 3. Пример чертежа раскроя оболочки, выданного ЭВМ при расчете методом конечных элементов

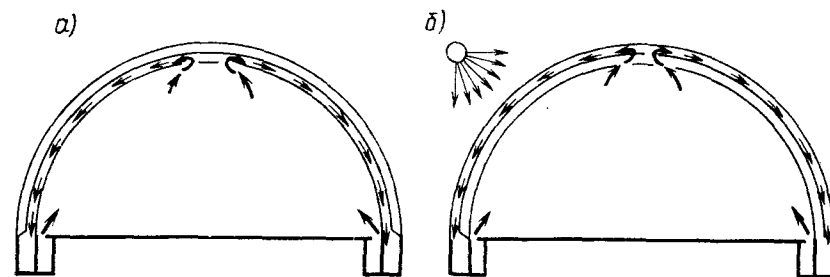


Рис. 4. Схемы циркуляции воздуха в сооружении с многослойной оболочкой покрытия

а — при отоплении; б — при использовании тепла солнечной энергии

В последнюю очередь устанавливают мягкие клапаны для регулирования подачи воздуха в полость оболочки (в ее нижних углах) и производят уплотнение примыканий внутреннего экрана.

Регулирование микроклимата сооружения (рис. 4). Подача приточного воздуха в помещение осуществляется, как правило, по периметру сооружения; при большом объеме помещения могут оказаться необходимыми дополнительные средства подачи воздуха. Приточный воздух подается из опоясывающего сооружение подпольного приточного канала, который обычно совмещают с фундаментом. Канал должен быть соответствующим образом изолирован для исключения теплопотерь.

Для вытяжной вентиляции помещения целесообразно использовать избыточное давление воздуха. При этом воздух выходит из помещения через все имеющиеся отверстия, которые должны быть правильно размещены. Прежде всего отверстия предусмотрены во внутреннем экране оболочки, вдоль линий ендов. Через эти отверстия воздух, увлажненный вследствие испарения воды с зеркала бассейна, попадает из помещения в нижнюю (внутреннюю) полость оболочки покрытия. Так как полость оболочки в ее нижних углах соединена с вытяжным каналом, воздух в полости движется сверху вниз, равномерно вентилируя всю поверхность покрытия. Принятые большие сечения полостей обеспечивают очень малую скорость движения воздуха. Использование такой системы воздухообмена позволяет осуществлять вентиляцию помещений большого объема при очень малых скоростях движения воздуха, что обеспечивает комфортные условия для находящихся в помещении людей. При этом исключаются плохо проветриваемые «мертвые зоны», а поверхность внутреннего экрана оболочки хорошо прогревается обтекающим ее потоком воздуха.

Температура приточного воздуха может быть относительно низкой, что повышает КПД отопительной установки, поскольку повышением температуры приточного воздуха компенсируются лишь незначительные теплопотери через внутренний экран в обтекаю-

щий его воздух, но не суммарные теплотери через всю оболочку, окна и наружные стены.

Тепловая энергия солнечной радиации, проникая сквозь верхние (наружные) слои оболочки, поглощается воздухом, циркулирующим в ее нижней (внутренней) полости, и с ним поступает в установку кондиционирования. Здесь эта энергия может быть использована для подогрева приточного воздуха или для других целей. Если же используются дополнительные источники тепла (например, для подогрева воды в душах и бассейнах, в том числе открытых), то нагретый воздух может быть отведен для проветривания верхней (наружной) полости оболочки, не попадая в ее промежуточные (изоляционные) полости. Для этого в промежуточных слоях оболочки вдоль линий ендов устанавливают специальные клапаны над отверстиями во внутреннем экране.

Степень использования тепловой солнечной энергии зависит от светопропускаемости наружной мембраны, что следует учитывать при выборе ткани. Измерения в климатических камерах показали, что КПД использования солнечной энергии может достигать 20—24 %.

Необходимое для стабилизации оболочки избыточное давление воздуха может быть эффективно использовано и для других нужд, например для вентиляции отдельных помещений (душевых, уборных и т. п.) при устройстве специальных вытяжных каналов. Таким образом можно сократить затраты на установку, обслуживание и энергоснабжение отдельных вентиляционных агрегатов.

Кондиционирование. Сооружение оборудуется обычными кондиционерами, включающими вентиляторы, фильтры и теплообменники. Дополнительно устанавливаются два делительных клапана для поддержания постоянного избыточного давления в помещении или для его регулирования при изменениях скорости ветра. Для обеспечения стабильности воздухопорной оболочки установка для кондиционирования воздуха имеет два вентилятора одинаковой мощности, из которых постоянно работает один. При его выходе из строя (например, вследствие обрыва клинового ремня или повреждения подшипника) автоматически включается второй вентилятор; таким образом поддерживается неизменным не только избыточное давление, но и температурный режим помещения. В случае прекращения подачи тока включается аварийный вентилятор с двигателем внутреннего сгорания или аварийный генератор, используемый также для питания аварийной осветительной сети. Кондиционеры подсоединяются по возможности непосредственно к приточно-вытяжному вентиляционному каналу, размещаемому обычно под полом.

В плавательных бассейнах вода для заполнения ванны прокачивается специальным небольшим насосом через теплообменник первой ступени кондиционера для рециркулируемого воздуха. При этом происходит охлаждение воздуха и одновременно подогрев воды; в летнее время можно так же подогревать воду для открытого бассейна. В других сооружениях аналогичный принцип может

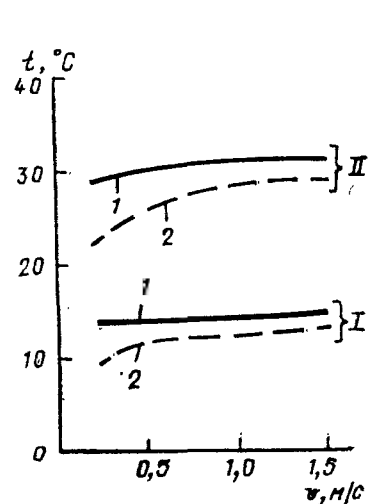


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха, обтекающего оболочку с внутренней стороны, от скорости его движения

I — при наружной температуре -15°C , внутренней температуре 15°C и относительной влажности 60 %; II — при наружной температуре -15°C , внутренней температуре 32°C и относительной влажности 60 %; 1 — приток; 2 — вытяжка

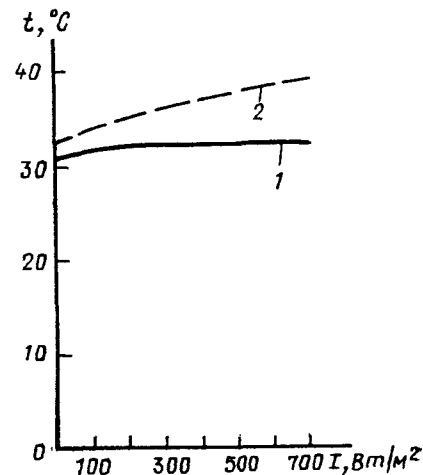


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха, обтекающего оболочку с наружной стороны, от интенсивности тепловой радиации I при наружной температуре 40°C и относительной влажности 50 %, внутренней температуре 32°C и относительной влажности 60 %

1 — приток; 2 — вытяжка

быть использован для подогрева воды в резервных емкостях отопительной системы.

Теплоизоляция оболочки. Коэффициент теплопередачи. Применение многослойных оболочек покрытий позволяет значительно сократить теплотери в сооружениях. Первая двухслойная оболочка, сооруженная в октябре 1973 г., еще до энергетического кризиса имела коэффициент теплопередачи около $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, что соответствует снижению энергозатрат по сравнению с однослойной оболочкой примерно на 20 %.

Коэффициент теплопередачи пятислойной оболочки составляет уже около $1,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, что было установлено расчетом и многочисленными испытаниями в климатических камерах (рис. 5—9 и таблица). Такое значительное повышение теплоизоляционных свойств оболочки не только намного сокращает теплотери, но одновременно позволяет аккумулировать тепловую энергию солнечной радиации и даже снабжать этой энергией сторонних потребителей тепла. Как показали испытания в климатической камере, при наружной температуре -15°C и внутренней температуре 32°C (что соответствует максимальному для средневропейских условий температурному перепаду, наблюдаемому не более нескольких часов или дней в году) и при интенсивности тепловой

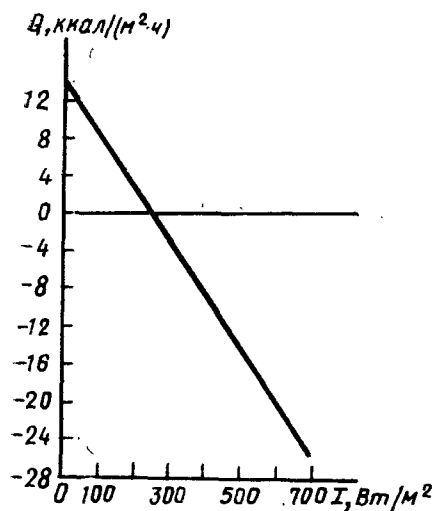


Рис. 7. Зависимость теплового потока Q , проходящего через оболочку, от интенсивности тепловой радиации I при обтекании оболочки воздухом с внутренней стороны со скоростью 0,7 м/с, наружной температуре -15°C , внутренней температуре 32°C и относительной влажности 60 %

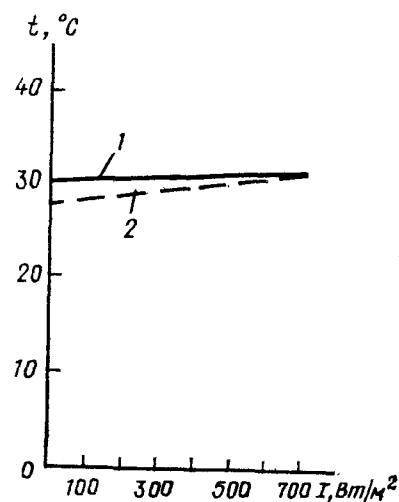


Рис. 8. Зависимость температуры воздуха t , обтекающего оболочку с внутренней стороны от интенсивности тепловой радиации I при скорости движения воздуха 0,7 м/с, наружной температуре -15°C , внутренней температуре 32°C и относительной влажности 60 %

1 — приток; 2 — вытяжка

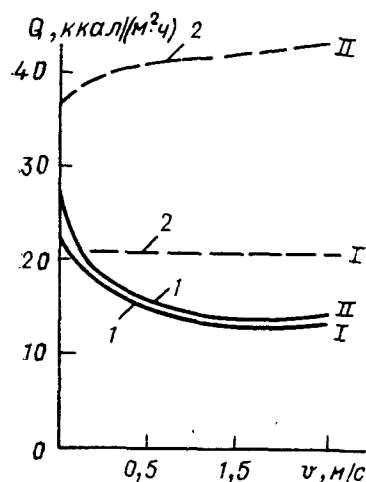


Рис. 9. Зависимость теплового потока Q , проходящего через оболочку, от скорости движения воздуха v , обтекающего ее с внутренней стороны
I — при наружной температуре -15°C , внутренней температуре 15°C и относительной влажности 60 %; II — при наружной температуре -15°C , внутренней температуре 32°C и относительной влажности 60 %; 1 и 2 — замеры соответственно с внутренней и наружной сторон оболочки

солнечной радиации 250 Вт/м^2 потери тепла через покрытие практически не происходит.

Благодаря возможности переключения циркуляции воздуха из внутренней (нижней) в наружную (верхнюю) полость оболочки и наоборот можно оптимально регулировать расход энергии как на

Теплотехнические характеристики оболочки

Расчетный случай	Температура, $^{\circ}\text{C}$		Значения K , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ и $1/\lambda$, $\text{м} \cdot \text{K}/\text{Вт}$			
			вычисленные			измеренные
	наружная	внутренняя	K при $\alpha_n = 23,3$ $\alpha_v = 8,1$	$1/\lambda$	K при $\alpha_n = \alpha_v = 9,3$	$1/\lambda$
I	-15	15	$1,13$	$0,71$	$1,11$	$0,69$
II	-15	32	$1,22$	$0,65$	$1,06$	$0,73$

Примечание. α_n и α_v — коэффициенты теплоотдачи соответственно у наружной и внутренней поверхностей оболочки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

отопление, так и на необходимое в летнее время охлаждение помещений. В будущем, с применением новых материалов, можно считать возможным двухкратное повышение термического сопротивления покрытия по сравнению с приведенными выше цифрами, т.е. снизить значение коэффициента теплопередачи примерно до $0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Пароизоляция оболочки. Как известно, существует мало материалов, которые совершенно не пропускают водяных паров. Не являются вполне паронепроницаемыми и текстильные материалы, применяемые для оболочек воздухоопорных сооружений. К тому же практически невозможно обеспечить эффективную в течение длительного времени герметизацию всех соединений при изготовлении и монтаже оболочки, не говоря уже об ее возможных случайных повреждениях. Поэтому при проектировании покрытий следует лишь руководствоваться правилом, что сопротивление оболочки паропрониканию должно постепенно снижаться изнутри (от первого промежуточного слоя) наружу. В выполненных к настоящему времени оболочках наружный слой пропускает в 9—13 раз больше водяных паров, чем промежуточные слои; тем самым обеспечивается осушение воздуха, находящегося в полостях оболочки, и сохранение ее теплозащитных свойств.

Все же при очень низких наружных температурах на внутренней (нижней) поверхности наружного слоя оболочки может образовываться иней. Поэтому при наружных температурах ниже -5°C (главным образом, в ночное время) в наружную полость оболочки подают противотоком из воздухозабора сухой воздух, который поглощает влагу из наружной полости, проникает сквозь неплотности в промежуточных слоях оболочки во внутреннюю (нижнюю) полость и выводится из нее вытяжной системой вентиляции вместе с воздухом, поступающим из помещения. В дневное время при интенсивности тепловой солнечной радиации 60 Вт/м^2 (минимальное зарегистрированное значение на территории ФРГ в зимний период) наружная температура, при которой на оболочке может образовываться иней, снижается примерно до -9°C . Используя описанный способ осушения, можно исключить образова-

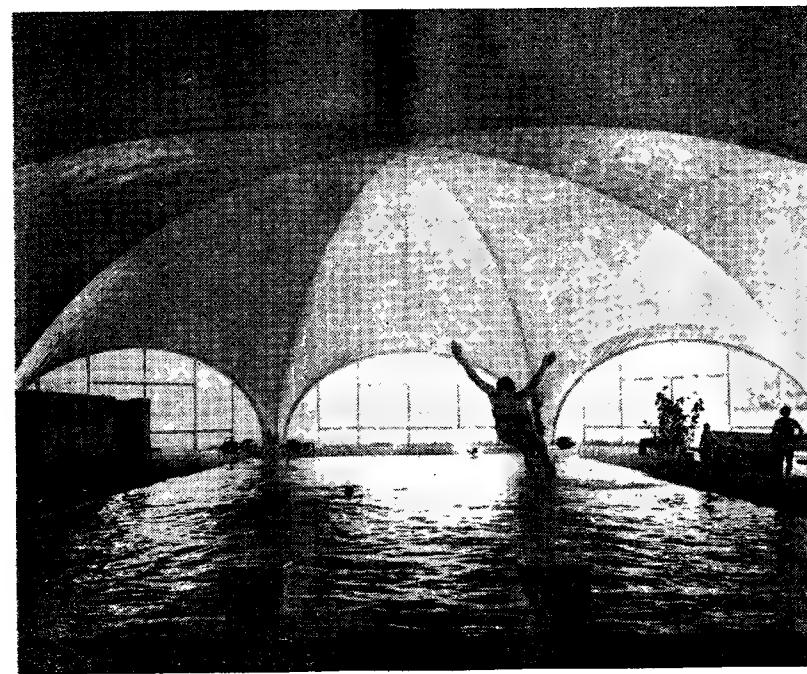
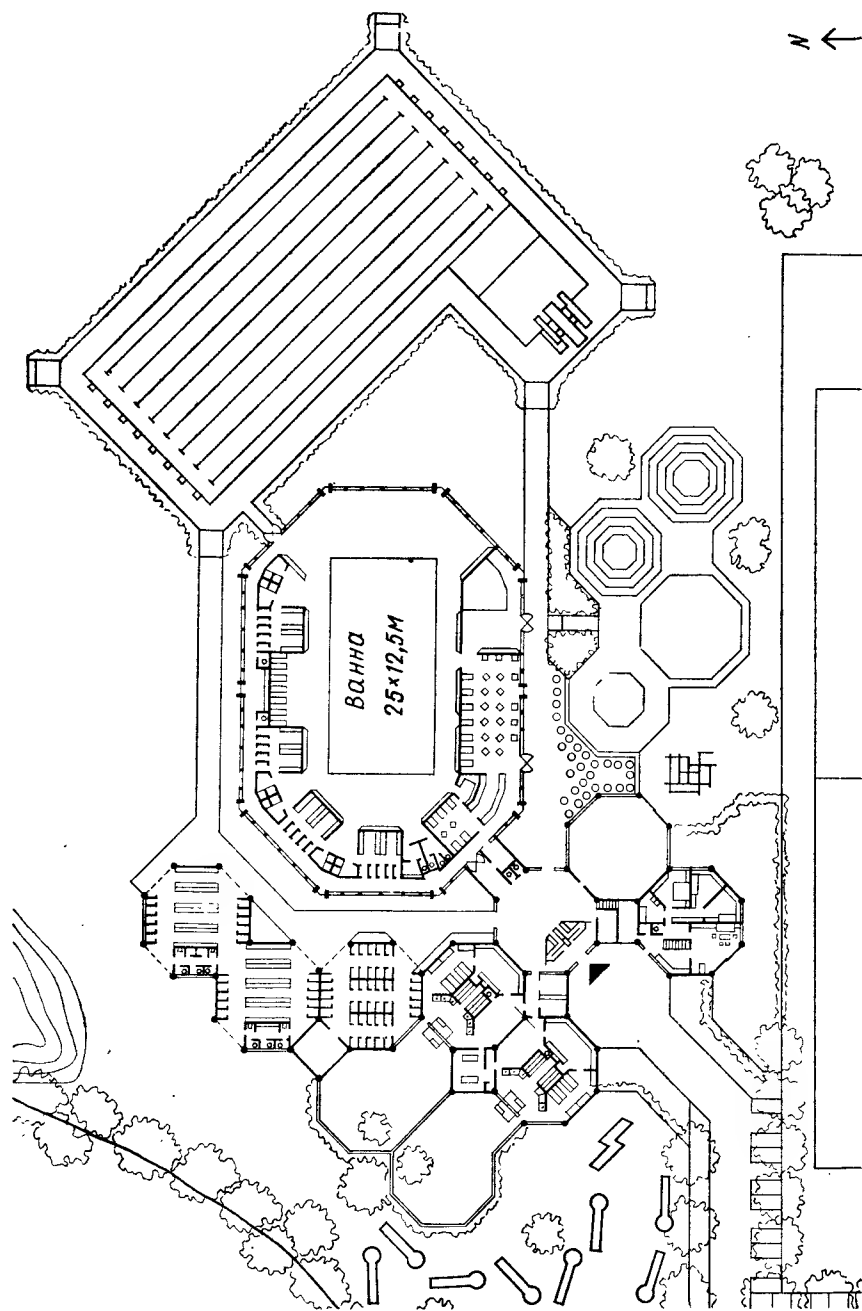


Рис. 10. Бассейн в Нейхофен-Кремсе, Австрия (генплан, общий вид и интерьер)

ние конденсата на поверхности наружного слоя оболочки даже при наружной температуре -15°C .

Затраты на эксплуатацию необходимого при этом небольшого противоточного вентилятора весьма малы, и ими можно практически пренебречь.

Снеговая нагрузка. Снег на оболочке откладывается обычно лишь в ее верхней части, имеющей малый уклон. Поскольку сухой снег представляет собой хорошую теплоизоляцию, происходит подтаивание его нижнего слоя, соприкасающегося с теплой оболочкой, и снег сразу же сползает с покрытия. Таяние снега можно еще ускорить кратковременной подачей теплого воздуха в наружную (верхнюю) полость оболочки. Сильные снегопады бывают обычно при наружной температуре, близкой к нулю; поэтому рассчитывать кондиционеры на большие тепловые нагрузки нет необходимости. Кратковременный расход тепла на таяние снега практически не сказывается на эксплуатационных затратах.

Акустика оболочек. Пневматические сооружения описанной системы обладают лучшими акустическими свойствами, чем обычные цилиндрические воздухоопорные оболочки. Акустика улучшается здесь благодаря расчленению покрытия на отдельные сегменты. Хорошие акустические свойства оболочки достигаются также свободной точечной подвеской внутреннего экрана и промежуточных слоев с применением упругих элементов; кроме того, экран и промежуточные слои оболочки обладают различной массой на единицу поверхности.

Для достижения оптимального акустического эффекта внутренний экран может быть выполнен с мелкой перфорацией; при этом над ним подвешивают дополнительный промежуточный слой, отражающий и рассеивающий звуковые волны.

Пока не установлено, что является большей помехой — шум, проникающий из помещения наружу, или шум, проникающий в помещение с улицы, сквозь оболочку покрытия.

Возведенные сооружения

Бассейн в Нейхофен-Кремсе, Австрия (рис. 10). Бассейн, построенный в 1973 г., еще до нефтяного кризиса, перекрыт двухслойной оболочкой и отапливается нагретым воздухом, подаваемым под давлением. В 1977 г. университетом в Штутгарте (ФРГ) в рамках программы архитектурно-психологических исследований было проведено обследование 66 различных объектов, сопровождавшееся анкетированием мнения посетителей. Бассейн в Нейхофене был охарактеризован посетителями как «интересный, живописный, светлый, привлекательный, уютный и оригинальный», что резко контрастировало с оценкой традиционно решенного бассейна в Штутгарте (см. журнал «Bild der Wissenschaft», 1977, Н. 12).

Закрытый и открытый бассейны в Куппенхайме близ Карлсруэ, ФРГ. Воздухоопорное сооружение типа «Лин» 8211 — первое из построенных сооружений с пятислойной оболочкой — эксплуатируется с августа 1978 г. Посещаемость комплекса необычайно высока, что зафиксировано в отчете об исследованиях, выполненных университетом в Штутгарте. Отмечено также психологически удачное решение комплекса, заложенное в проекте.

Бассейн с искусственным прибоем в Штейне близ Нюрнберга, ФРГ. Бассейн обычного типа, построенный из традиционных кон-

струкций, плохо посещаемый и убыточный, был реконструирован и расширен путем пристройки ресторана, сауны и еще одного бассейна с искусственным прибоем, перекрытого пневмооболочкой системы «Лин». Новый комплекс эксплуатируется с декабря 1979 г.; посещаемость его увеличилась в 7 раз, причем полученный доход возмещает все эксплуатационные затраты.

Опыт эксплуатации и перспективы применения. Оболочка покрытия бассейна в Нейхофен-Кремсе (Австрия) не подвергалась чистке в течение восьми лет; за это время в результате загрязнения цвет наружного слоя оболочки из яркооранжевого (RAL 2000) стал вначале красновато-коричневым, затем темно-коричневым. Изнутри помещения это загрязнение практически незаметно. Поверхность внутреннего экрана остается совершенно чистой и выглядит как новая, хотя она тоже не подвергалась чистке за время эксплуатации.

За истекший период на основании опыта возведения и эксплуатации построенных сооружений разработаны и переданы заказчикам многочисленные проекты спортивных залов, теннисных кортов, катков, залов для катания на роликовых коньках и для игры в сквош¹, а также других сооружений для отдыха.

ДВУХСЛОЙНОЕ ВОЗДУХООПОРНОЕ ПОКРЫТИЕ, УСИЛЕННОЕ КАНАТАМИ

Э. Фрицше, Г. Вольф, Г. Айзенхут (ГДР)

Одной из задач, решаемых Научно-исследовательским комплексом по комбинированным тканевым конструкциям при Отделении инженерных конструкций Лейпцигского политехнического института, является проектирование воздухоопорных оболочек, усиленных канатами. Исследования в этой области ведутся по двум направлениям:

замена высокопрочных конструкционных тканей материалами с более низкой разрывной прочностью в сочетании с линейными и сетчатыми системами усиливающих канатов;

применение большепролетных пологих оболочек, в которых стальные канаты воспринимают значительную долю усилий.

Первым экспериментальным объектом (спортзал), где использовалась усиленная канатами пологая воздухоопорная оболочка, было покрытие опорной части ранее существовавшего бетонного сооружения, кольцевая стена которого высотой 5 м опоясывала круглую площадку, занимающую 1810 м². Толщина стены у основания 2,1 м, сверху — 1,5 м. Поверху стены был устроен монолит-

© Ehler Fritzsche Georg Wolf, Günter Eisenhut, 1983.

¹ Игра в мяч наподобие тенниса (Прим. перев.).

ный железобетонный кольцевой пояс сечением $0,6 \times 2,5$ м, служащий противовесом для анкерной системы воздухоопорного покрытия.

Покрытие состоит из двух пневматически напряженных тканевых оболочек, расположенных одна над другой на расстоянии 200 мм. С учетом прочности ткани для устройства воздухоопорного покрытия с пролетом около 50 м, стрелой подъема 5 м и радиусом кривизны 60 м потребовалось применение несущих стальных канатов, которые располагались ортогонально с шагом 11,6 м (рис. 1). Высота зала до покрытия в центре более 10 м, его объем около $13\,300 \text{ м}^3$.

Для подачи воздуха под мягкую оболочку применены центробежные вентиляторы, размещенные в техническом помещении рядом со складывающимися воротами для крупногабаритных транспортных средств напротив главного входа в зал. Помещение главного входа, оборудованное четырехстворчатой вращающейся дверью и обычным шлюзом с двухстворчатыми распашными дверями, одновременно связывает зал с существующим зданием, где размещаются раздевалки, душевые и туалеты. Складывающиеся ворота и шлюз могут использоваться как аварийные выходы.

Детали конструктивного решения. Железобетонный кольцевой пояс с площадью сечения $1,50 \text{ м}^2$ и средней длиной по периметру 154,7 м предназначен для восприятия горизонтальных (направленных к центру) и вертикальных (направленных вверх) усилий от внутреннего давления и ветрового отсоса, передаваемых стальными канатами и самими оболочками покрытия. Анкеровка кольца к существующей стене не предусматривается. Для восприятия расчетных усилий было бы достаточно и меньшее поперечное сечение кольца, но его размеры были приняты конструктивно, исходя из толщины существующей стены и из необходимости размещения узлов анкеровки канатов и зажимного профиля для крепления оболочек покрытия. Кольцо выполняется из бетона марки 225 с арматурой из стали класса АІ; расход бетона составляет около 210 м^3 , стали — около 7,75 т. Кольцо бетонируется шестью отсеками. Для водостока поверху кольца укладывается слой раствора с уклоном 1,2 % и дополнительно выполняется обделка листовым алюминием с целью предотвращения просачивания в бетон воды и его разрушения при морозе.

Анкерные блоки для стальных канатов замоноличены в кольцевом поясе (рис. 2). Концы канатов снабжены плетеными петлями с коушами, которые с помощью двойных накладок и болтов подвижно закреплены к анкерным блокам. В местах пересечения канаты соединяются между собой скобами с прокладками из листовой стали. К каждому анкерному блоку приварено шесть стальных стержней диаметром 20 мм, заделанных в бетон на длину 900 мм.

Ортогональная сетка канатов, отстоящих на 11,6 или 11,4 м один от другого и на 6,8 м от краев покрытия, делит каждую оболочку на девять одинаковых квадратных участков в ее средней

Рис. 1. План и разрез спортзала

1 — существующее здание; 2 — воздушный шлюз; 3 — тросовая сеть; 4 — вентиляционная установка с контролирующими приборами; 5 — железобетонный кольцевой пояс; 6 — двухслойная воздухоопорная оболочка; 7 — вращающиеся двери; 8 — ворота с воздушной завесой; 9 — анкерные блоки

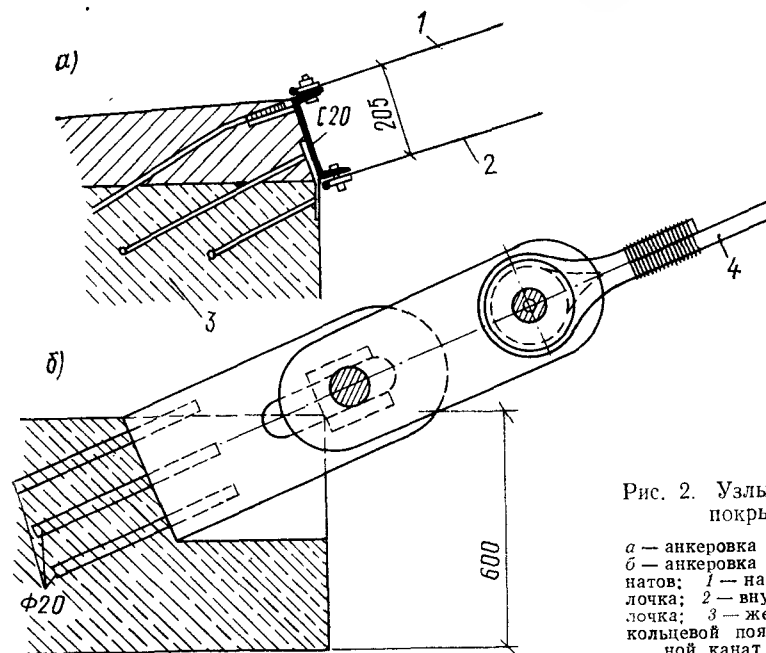
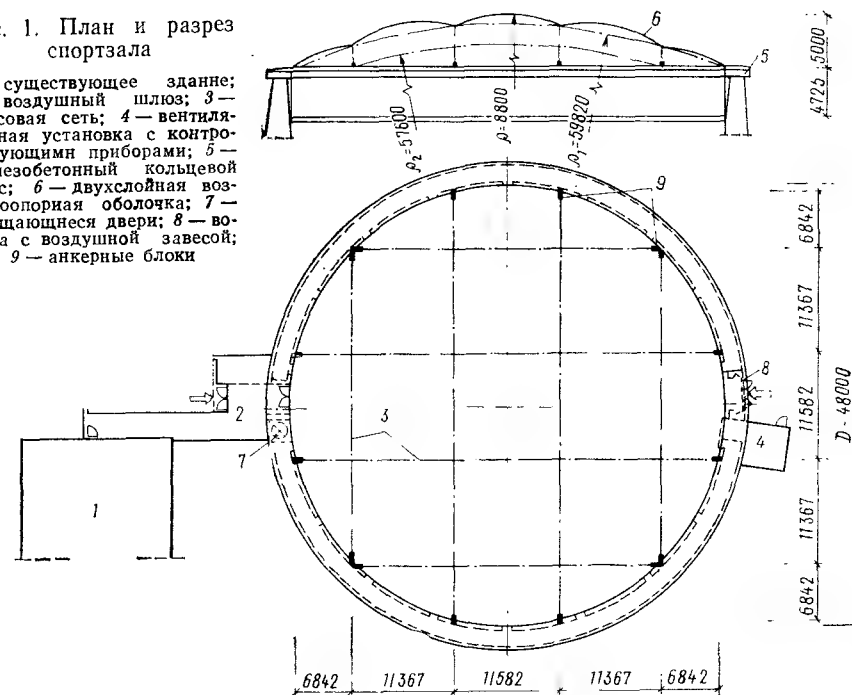


Рис. 2. Узлы анкерки покрытия

а — анкерка оболочек; б — анкерка стальных канатов; 1 — наружная оболочка; 2 — внутренняя оболочка; 3 — железобетонный кольцевой пояс; 4 — стальной канат $\varnothing 32 \text{ мм}$

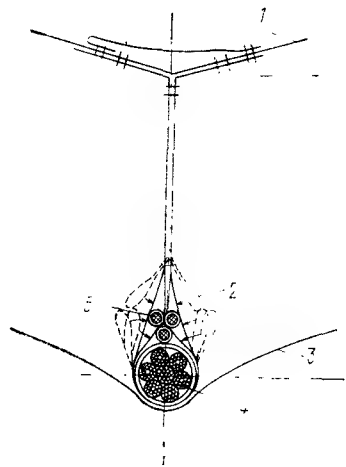


Рис. 3. Соединения оболочек с канатами

1 — наружная оболочка; 2 — тканевые петли; 3 — внутренняя оболочка; 4 — стальной канат диаметром 32 мм; 5 — шнуровочные фалы

ширина ткани 1350 мм. В соответствии с возможностями предприятия-изготовителя каждая оболочка выполнена из четырех одинаковых готовых полотнищ с разъемными монтажными соединениями на шнуровке. Максимальная длина полотнища ткани (по оси внутренней оболочки) составляет 52,14 м. Стальные канаты прикреплены непосредственно к нижней оболочке с помощью нашитых на нее тканевых петель. С нижней стороны наружной оболочки нашиты тканевые подвески с тем же шагом, что и петли на внутренней оболочке, при этом петли и подвески соединяются между собой в три ряда пропущенными сквозь них фалами по типу «рояльных петель» (рис. 3).

Для создания перепада давлений воздуха в помещении и в полости между оболочками предусмотрены отверстия во внутренней оболочке по ее периметру, позволяющие регулировать поступление воздуха в полость. Обе оболочки прикрепляются к швеллерному профилю, забетонированному у верхнего внутреннего края кольцевого пояса (наружная оболочка — к верхней полке, внутренняя — к нижней), с помощью стальных полосовых накладок. Чтобы обеспечить правильность монтажа, болты М16 для крепления накладок приваривают к швеллеру заранее таким образом, что на его верхней полке они обращены нарезанной частью наружу, а на нижней — внутрь; шаг болтов не превышает 300 мм.

Расход ткани на две оболочки покрытия составляет около 2000 м²; для подвесок, петель и фартука потребовалось еще около 600 м² ткани. Фартук по периметру наружной оболочки прикреплен к бетонному покрытию пристрелянными дюбелями.

части и на четыре четырехугольных и восемь треугольных участков по краям. Радиус кривизны оболочек между канатами на средних участках составляет 8,8 м. Восемь канатов располагаются по дугам окружностей, лежащих в плоскостях, параллельных двум взаимно перпендикулярным плоскостям большого круга, проходящим через полюс купола. Радиусы кривизны канатов составляют соответственно 59,82 и 57,60 м, а их длины — 47,11 и 32,86 м. В конструкции покрытия использованы стальные канаты диаметром 32 мм. Они передают через анкерные устройства на железобетонный кольцевой пояс усилия, возникающие в оболочках покрытия от внутреннего давления и ветрового отсоса.

Для оболочек использована ткань из полиамидного корда типа SPA 360 по стандарту TGL 16-619001/01 со светопропускаемым покрытием из ПВХ;

Ряды подвесок и петель прерываются в местах пересечения тросов и установки соединительных скоб. В местах анкеровки канатов во внутренней оболочке сделаны вырезы и к ней подшиты клиновидные вставки, прикрепленные к водосборным лоткам из листовой стали; таким образом осуществляется сбор и отвод конденсата из полости между оболочками. Эти клиновидные вставки используются также для компенсации возможных неточностей в раскрое оболочек; такие же вставки-компенсаторы имеются и в наружной оболочке. Покрытие выполнено с таким расчетом, что примерно после восьми лет эксплуатации потребуется замена наружной оболочки, а внутренняя оболочка будет служить вдвое дольше.

Для стабилизации конструкции покрытия при нормальных условиях эксплуатации предусмотрено внутреннее давление 8—20 мм вод.ст. (0,08—0,20 кПа), создаваемое двумя центробежными вентиляторами. Необходимое для стабилизации наружной оболочки избыточное давление в полости покрытия обеспечивается системой снабженных клапанами отверстий по периметру внутренней оболочки. При ураганном ветре или снегопаде внутреннее давление может быть повышено максимально до 35 мм вод.ст. (0,35 кПа) путем подключения третьего вентилятора. Это давление может, однако, оказаться недостаточным для стабилизации покрытия при большой толщине снежного покрова, в связи с чем предусмотрена система воздушного отопления зала, обеспечивающая поддержание в помещении температуры 10 °С, при которой снег на покрытии быстро тает. Только в случае особо сильного снегопада или отказа системы отопления может оказаться необходимым убрать снег с покрытия вручную. Система отопления, естественно, обеспечивает также возможность эксплуатации спортзала в зимний период. В вентиляционной камере установлен еще четвертый, резервный вентилятор того же типа, что и три рабочих.

Для подогрева подаваемого в помещение наружного воздуха в зимний период каждый из вентиляторов снабжен отопительным регистром. Подаваемый воздух проходит систему глушителей, поглощающих шум от работы моторов вентиляторов. В помещении рядом с главным входным шлюзом размещается аварийный генератор, обеспечивающий питание вентиляторов в случае выхода из строя сети электроснабжения.

Для ввода в зал крупногабаритных транспортных средств использован принцип «воздушной завесы»: при открывании складывающихся ворот включаются дополнительно две группы осевых вентиляторов типа LANWD 500, по пять в каждой, что компенсирует падение давления воздуха в помещении. Главный вход в зал и обслуживающие помещения выполнены в традиционных конструкциях.

Применение двухслойной конструкции покрытия обеспечивает оптимальный режим работы отопительной системы в зимний период и исключает чрезмерный перегрев помещения летом. Решающее значение для обеспечения надежного функционирования зала имеет

постоянный контроль внутреннего давления с учетом погодных условий (скорости ветра и снеговой нагрузки). При этом малая кривизна покрытия облегчает решение проблемы надежности. Возможное опускание покрытия при падении внутреннего давления из-за отказа электросети или при слишком большой снеговой нагрузке несущественно для состояния конструкции. В этом случае оболочка может опуститься до пола только в центре зала; поскольку все оборудование в зале не является стационарным и может быть при хранении размещено по его периметру, края оболочки при ее опускании не будут повреждаться выступающими предметами.

Для освещения зала в темное время суток установлены настенные светильники, создающие подсветку оболочки снизу. Днем благодаря светопроницаемости материала оболочки дополнительное освещение не требуется.

Монтаж покрытия. До начала основных работ по монтажу производят вытяжку и предварительную подвеску стальных канатов, чтобы точно выверить их длину и отрегулировать анкерные устройства. Для фиксации точек закрепления канатов используют специальные компенсационные вставки, устанавливаемые в нужном положении в зависимости от длины каната в отверстиях анкерных блоков. Канаты, по два одновременно, подтягивают лебедками к анкерным блокам, используя замоноличенные в бетонном поясе петли и установленные на них монтажные кронштейны, после чего закрепляют болтами диаметром 75 мм. Концы канатов, снабженные коушами, крепят к анкерным листам, для чего по оси пропущенных сквозь коуши болтов сделаны отверстия, в которые вставляют монтажные скобы. После подвески всех восьми канатов их неподвижно соединяют между собой скобами в заранее размеченных местах пересечения.

Тросовая сеть после ее предварительного монтажа провисает над полом зала с минимальным зазором 30 см, что позволяет легко произвести раскладку полотнищ внутренней оболочки покрытия. Четыре полотнища раскладывают таким образом, чтобы их стыки располагались точно по двум взаимно перпендикулярным осям кругового плана зала, после чего соединяют между собой посредством двойной шнуровки фалами из полиамидного волокна по типу «рояльной петли».

Затем тросовую сеть опускают на собранную внутреннюю оболочку, извлекая болты из коушей и стравливая лебедки. Стальные канаты выравнивают точно по линиям петель (длиной 100 мм каждая), нашитых с верхней стороны оболочки, и закрепляют через одну петлю посредством шнуровки фалами из полиамидного волокна. Оставшиеся петли служат для крепления наружной оболочки, также состоящей из четырех полотнищ, для чего шнуровкой соединяют подшитые к ней снизу подвески с петлями на внутренней оболочке. Предварительная сборка покрытия на полу заканчивается соединением на шнуровке полотнищ наружной оболочки. После этого можно приступить к подъему покрытия, который вы-

полняется, как и предварительная подвеска стальных канатов, с помощью лебедок.

Концы канатов вновь присоединяют к анкерным блокам, после чего крепят внутреннюю оболочку к нижней полке замоноличенного в бетонном поясе швеллера № 20 с помощью полосовых накладок на болтах, а затем таким же образом — наружную оболочку к верхней полке швеллера. Для притягивания края внутренней оболочки к анкерному профилю используют стальные трубы, продеваемые в нашитые на оболочку монтажные петли. После закрепления краев обеих оболочек обеспечивается необходимая герметичность покрытия, и можно создавать требуемое для его стабилизации внутреннее давление воздуха в помещении.

Описанное экспериментальное покрытие спортзала представляет собой первый шаг в развитии большепролетных воздухоопорных конструкций, усиленных стальными канатами. Этот эксперимент, проведенный с учетом имеющейся материальной базы, позволяет проверить принятую конструктивную систему на всех стадиях ее осуществления и эксплуатации. Впервые для усиления пологой воздухоопорной оболочки и для восприятия значительной части действующих в ней усилий применены стальные канаты. На участках между канатами тканевые оболочки имеют выпуклую форму с подъемом около 2 м над сферической поверхностью.

Данный проект осуществлен при небольших материальных и денежных затратах и является примером экономичного строительства с применением легких конструкций и рационального использования старого сооружения.

III. Материалы пневматических оболочек

СВОЙСТВА ТКАНЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ ПВХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ

В. Круммхойер (ФРГ)

Шестидесятые годы были периодом бурного расцвета пневматических и, в частности, воздухоопорных конструкций во многих промышленно развитых странах. В течение последующего десятилетия в использовании этих конструкций наступил некоторый застой, вызванный главным образом резким ростом стоимости энергии, что во многих случаях сделало неприемлемым применение пневматических конструкций для отапливаемых зданий. Тем не менее эти конструкции по-прежнему остаются объектом повышенного интереса со стороны архитекторов и экономистов.

Как показал опыт, определенные трудности в развитии конструкций были связаны также с недостаточно полным представлением о свойствах материалов пневматических оболочек. Вследствие этого материалы в конструкциях иногда использовались неэффективно [1] или к ним предъявлялись явно преувеличенные требования со стороны заказчиков, что иногда давало повод для негативной оценки пневматических конструкций вообще.

За последние годы накоплены данные, полученные на основе обширных испытаний материалов, которые позволяют в будущем избежать подобных неудач. В настоящей статье предпринимается попытка систематизировать эти данные и оценить их значение для решения практических задач проектирования пневматических конструкций.

Материалы. Если не считать пневматических конструкций небольшого размера, которые в ряде случаев могут быть выполнены из неармированных полимерных пленок, общим направлением в создании воздухоопорных оболочек является применение текстильных материалов (подложка) с покрытиями из эластомеров или термопластов [2]. Более ранние опыты по использованию неармированных пленок в сочетании с крупноячеистыми сетками из высокопрочных нитей не дали положительных результатов.

В качестве подложек применяют обычно технические ткани, тканые сетки (только при невысоких требованиях к прочности материала), ткани типа «малимо» и материалы с трикотажной основой.

Эти материалы могут быть изготовлены из промышленных синтетических волокон — полиэфирных, полиамидных, поливинилспиртовых, из стекловолокна, из волокна «арамид» и т. п.

Для покрытий наибольшее распространение получили: из термопластов — пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ), а в последнее время также политетрафторэтилен, из эластомеров — полихлоропрен.

В Западной Европе наиболее широко применяются ткани из полиэфирного волокна с покрытием из ПВХ; в Северной Америке, кроме того, используют ткани из полиамидного волокна с покрытием из полихлоропрена и стеклоткани с покрытием из политетрафторэтилена. В Японии применяют также ткани из поливинилспиртового волокна с покрытием из ПВХ. Наконец, в Восточной Европе отдают предпочтение высокопрочным тканям типа «малимо» из полиамидного волокна с покрытием из ПВХ.

Все эти материалы имеют свои достоинства и недостатки. Наиболее подробно описаны в литературе ткани из полиэфирного волокна с покрытием из ПВХ, с тех пор как они в силу причин экономического и технического характера заняли доминирующее положение в Западной Европе. Этим материалам посвящена в основном и настоящая статья.

При необходимости оценки механических свойств материалов оболочек приведенные ниже результаты могут быть во многих случаях распространены на ткани из полиэфирных волокон с другими видами покрытий (в том числе на ткани типа «малимо» или материалы с трикотажной основой). Это, однако, не касается прочности швов оболочек, поскольку она зависит не только от адгезии покрытия к подложке, но и от вида самого покрытия и его стойкости к воздействиям среды.

В тех случаях, когда не представляется возможным прямо использовать приведенные результаты испытаний, следует руководствоваться изложенным в статье общим подходом к учету свойств материала при расчете оболочек.

Свойства тканей с покрытием из ПВХ. Свойства этих материалов зависят как от самой ткани, так и от вида ее покрытия. Если механические свойства материала оболочки (кратковременные и длительные) являются по существу характеристиками ткани, то его долговечность определяется главным образом химической природой покрытия. Существует, кроме того, еще ряд важных свойств, в равной степени зависящих от обоих компонентов материала.

Механические характеристики.

Кратковременные характеристики. Прочность и растяжимость ткани с покрытием являются прежде всего функцией характеристики «усилие—удлинение» отдельных нитей. На рис. 1 показан пример такой характеристики для нитей из полиэфирного волокна. Аналогичной в общем зависимостью между напряжениями и деформациями характеризуется и ткань из таких нитей. Как видно из рис. 2, несмотря на одинаковую плотность нитей¹ основы и утка, характеристики ткани в двух взаимно перпендикулярных

Таблица 1. Характеристики стандартных типов тканей, применяемых в Западной Европе

Тип ткани	Переплетение	Глотность нитей на 1 см (основа/уток)	Весовой номер нитей, текс	Прочность ткани, Н/см			Снижение прочности при 70 °С, % (основа/уток)
				номинальная	фактическая (основа/уток) при температуре		
					комнатной	70 °С	
I	Плотняное 1/1	9/9	110	600	653/569	559/513	86/90
II	Рогожка 2/2	12/12	110	840	948/847	811/791	86/93
III	То же	10,5/10,5	167	1120	1174/1026	1016/945	87/92
IV	»	12/12	167	1300	1416/1264	1232/1176	87/93

направлениях различны. Это различие вызвано различной степенью искривления нитей основы и утка в системе переплетения ткани в связи с их неодинаковым натяжением как в ткацком процессе, так и в процессе нанесения покрытия. Таким образом, обработанная ткань характеризуется различием удлинений и модулей упругости в направлениях основы и утка.

Те же технологические причины обуславливают и анизотропию прочности ткани: уточные нити при растяжении испытывают более значительные поперечные усилия, что несколько снижает их эффективную прочность по сравнению с нитями основы. Эти различия в прочности иллюстрирует табл. 1, в которой приведены характеристики стандартных тканей четырех типов, применяемых сейчас в Западной Европе [3]. В таблицу включены показатели прочности тканей при температуре 70 °С с учетом возможного в условиях эксплуатации нагрева оболочек вследствие солнечной ра-

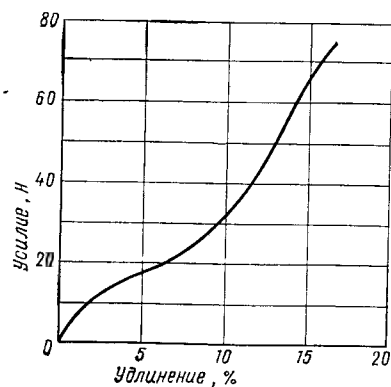


Рис. 1. Диаграмма «усилие—удлинение» для промышленных полиэфирных нитей 110 текс

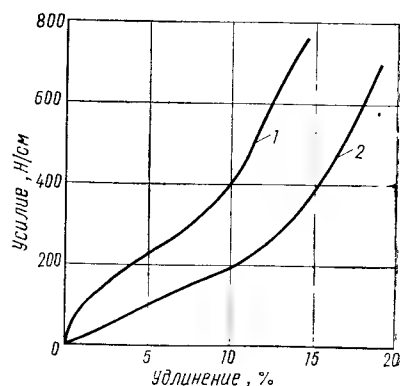


Рис. 2. Диаграмма «усилие—удлинение» для полиэфирной ткани типа I с покрытием из ПВХ

1 — основа; 2 — уток

диации. Температура 70 °С принята как максимально возможная по данным натурных измерений в умеренных климатических условиях Центральной Европы; для географических районов с более интенсивной тепловой солнечной радиацией может оказаться необходимым учет и более высоких температур. Как видно из табл. 1, при температуре 70 °С прочность тканей снижается примерно на 10 % по сравнению с их прочностью при комнатной температуре.

Кроме прочности самой ткани, важное значение имеет прочность ее соединений (швов) [3]. Прочность шва зависит в первую очередь от его геометрии. На рис. 3 показаны типы швов, применяемых в ФРГ для оболочек из тканей типов II и III (см. табл. 1). В табл. 2 приведены характеристики прочности этих швов (в абсолютных и относительных единицах) при комнатной температуре и при 70 °С; в некоторых случаях при более высокой температуре наблюдается заметное снижение прочности.

К показателям, требующим особого внимания при расчете и проектировании воздухоопорных конструкций, относится прочность соединений оболочки с анкерными устройствами. Она зависит не только от прочности ткани, но и от геометрии соединений и швов, которая может быть весьма разнообразной, в связи с чем в настоящей статье этот вопрос не рассматривается. В ФРГ применяют обычно стандартные типы таких соединений [4].

Поскольку в пневматических конструкциях материал оболочки подвергается, вообще говоря, двухосному растяжению, решающее значение имеет характеристика материала при таком напряженном

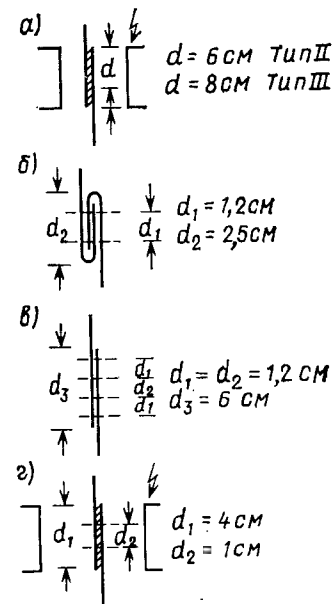


Рис. 3. Стандартные типы швов, применяемые в ФРГ (шаг стежков в шитых швах — 2,5/см)

а — сварной (высокочастотная сварка); б — шитый замковый; в — шитый накладной четырехстрочный; г — комбинированный шито-сварной

Таблица 2. Прочность швов ткани типа II (по утку)

Тип шва (см. рис. 3)	Прочность шва, Н/см, при температуре		Отношение прочности шва к прочности ткани, %, при температуре	
	комнатной	70 °С	комнатной	70 °С
Сварной (высокочастотная сварка)	802	695	91	79
Замковый	470	372	53	42
Накладной четырехстрочный	550	447	62	51
Комбинированный	813	582	92	66

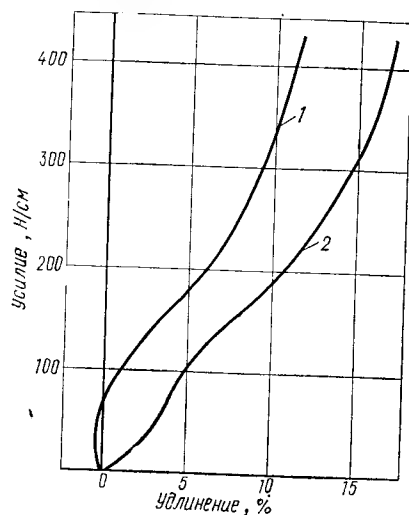


Рис. 4. Диаграмма «усилие—удлинение» при двухосном растяжении полиэфирной ткани типа I с покрытием из ПВХ (отношение усилий по основе и утку — 1:1)
1 — основа; 2 — уток

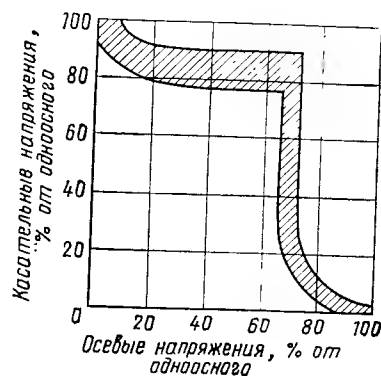


Рис. 5. Отношение значений прочности ткани с покрытием из ПВХ при двухосном и одноосном растяжении в зависимости от отношений усилий по основе и утку

состоянии. Соответствующие исследования проводили многие авторы [5—9]; особый интерес представляют результаты испытаний цилиндрических (трубчатых) образцов, выполненных Б. Меффертом

[6, 7]. Им установлено, что при двухосном деформировании ткани разрывные усилия и удлинения при разрыве уменьшаются по сравнению с одноосным растяжением, а кривая «усилие—удлинение» имеет более крутой наклон (рис. 4). На рис. 5 показана зависимость разрывной прочности ткани по основе и утку от соотношения соответствующих усилий; снижение прочности по сравнению с одноосным растяжением составляет около 20 %, независимо от нагрузки.

Кроме разрывной прочности и удлинения при разрыве — характеристик, непосредственно используемых в расчете, — существует еще ряд механических свойств, играющих важную роль для оценки качества композиционных материалов оболочек. В первую очередь к ним относятся прочность при раздире и прочность сцепления покрытия с подложкой [10]. Важность этих показателей для практического применения тканей очевидна: прочность сцепления является фактором, определяющим прочность швов оболочки, а прочность при раздире характеризует сопротивляемость ткани распространению локальных повреждений. На рис. 6 и 7 показаны схемы испытания образцов ткани для определения прочности сцепления покрытия с подложкой и прочности при раздире.

Как видно из рис. 7, существует несколько различных методов испытания образцов тканей на раздир: в Англии применяют метод «язычка» (рис. 7, а), в Австрии, Бельгии, Нидерландах, Италии,

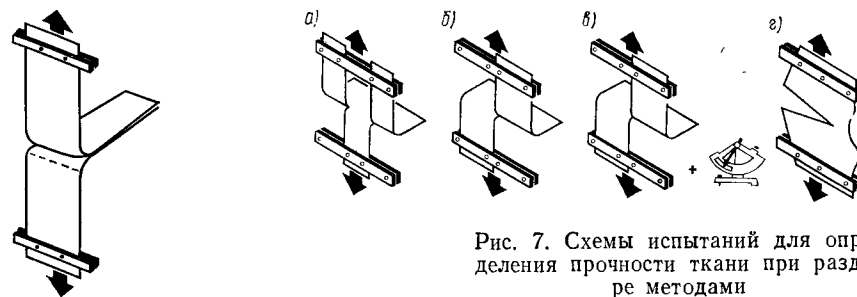


Рис. 6. Схема испытания для определения прочности сцепления (адгезии) покрытия с подложкой

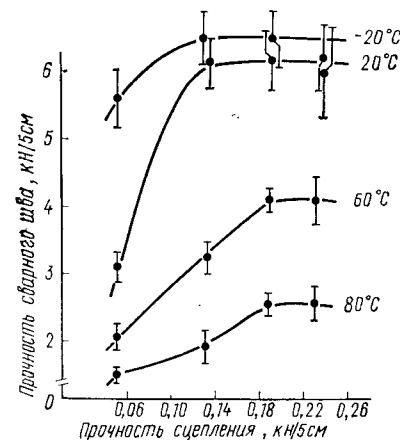


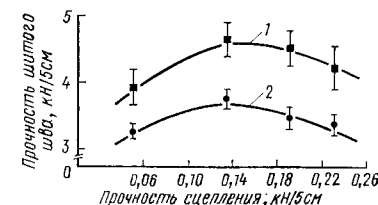
Рис. 7. Схемы испытаний для определения прочности ткани при раздире методами

а — «язычка»; б — «лапки»; в — «маятниковый»; г — «трапеции»

Рис. 8. Зависимость прочности сварного шва (высокочастотная сварка) по основе от прочности сцепления (адгезии) покрытия из ПВХ с подложкой

Рис. 9. Зависимость прочности шитых швов (по основе) от прочности сцепления (адгезии) покрытия из ПВХ с подложкой при температуре 20 °C

1 — накладной четырехстрочный шов; 2 — замковый шов



Финляндии и Скандинавских странах — метод «лапки» (рис. 7, б), во Франции и Швейцарии — «маятниковый» метод (рис. 7, в), в ФРГ — метод «лапки», а также метод «трапеции» (рис. 7, г). Методы «лапки», «язычка» и «маятниковый» основаны на одном и том же принципе: усилия прикладываются перпендикулярно к нитям ткани, прочность которых определяется; различие состоит лишь в том, что в методе «язычка» раздир ткани производится по двум симметрично расположенным линиям, а в «маятниковом» методе — при большой скорости перемещения захвата. В отличие от этих методов при испытании по методу «трапеции» нити, прочность которых оценивается, располагаются параллельно направлению раздирающего усилия. Сравнительными испытаниями [10] было установлено, что корреляции между значениями прочности ткани при раздире, полученными при использовании указанных двух принципиально различных методов, отсутствует.

Для практических целей можно рекомендовать применение метода «трапеции», в сочетании с одним из трех других методов, на-

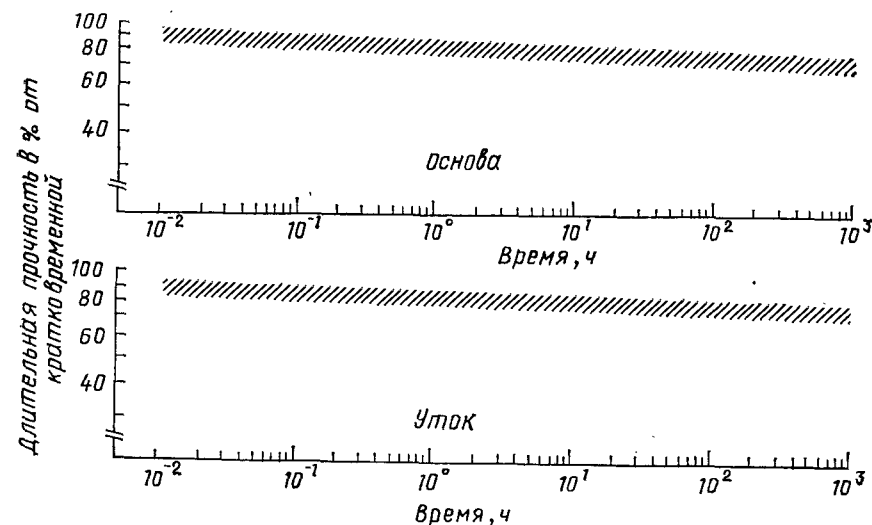


Рис. 10. Длительная прочность полиэфирной ткани типа II (диолон 174 S 110 текс) с покрытием из ПВХ при температуре 23°C

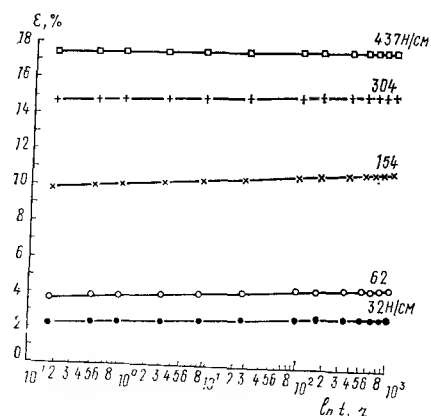
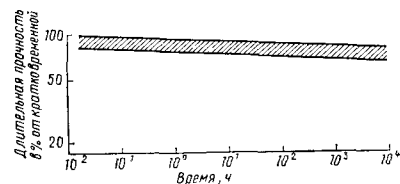


Рис. 11. Длительная прочность комбинированного шва ткани типа II при температуре 23°C

Рис. 12. Ползучесть полиэфирной ткани типа I с покрытием из ПВХ при температуре 40°C и различных нагрузках (ε — удлинение)



пример с методом «лапки». Хотя испытание по методу «трапеции» и более точно воспроизводит характер локального разрушения оболочки, качественное различие между разрывной прочностью ткани и ее сопротивлением «раздиру» не обнаруживается при этом испытании так четко, как, например, при использовании метода «лапки» [10, 11]. Кроме перечисленных выше стандартных методов определения прочности тканей при раздире, следует отметить еще ряд способов, имеющих целью обеспечить лучшее соответствие условий испытания действительному напряженному состоянию материала в пневматических оболочках [12, 13].

На рис. 8 и 9 показана зависимость прочности швов различных типов от прочности сцепления покрытия из ПВХ с подложкой; как видно из графиков, максимальная прочность швов достигается при

прочности сцепления около 130 Н/5 см. Дать подобную оценку требуемого уровня прочности ткани при раздире не представляется возможным; по-видимому, эти характеристики вообще нельзя прямо использовать в статических расчетах. Единственное, что можно рекомендовать, — это устанавливать для тканей, применяемых в оболочках, возможно более высокие требования по их сопротивлению раздиру.

Длительные характеристики. Весьма важное значение имеет сопротивление материала оболочки и ее швов длительно действующим нагрузкам, поскольку на практике пневматические оболочки чаще используются для стационарных сооружений, нежели для временных. При этом наиболее важной характеристикой является длительная прочность материала или прочность при разрушении в условиях ползучести. Для определения этой характеристики образцы материала подвергают без перерывов действию постоянных по величине нагрузок до тех пор, пока образцы не разрушатся, и фиксируют время до разрушения. Чтобы это время было не слишком велико, нагрузки должны быть достаточно высокими; их следует, как правило, принимать с таким расчетом, чтобы в течение первых 1 000 ч испытания разрушилось не менее 10 образцов. Откладывая значения нагрузок и соответствующего им времени до разрушения образцов на графике в двойных логарифмических координатах, получают так называемую кривую разрушения в условиях ползучести; на рис. 10 показан пример такой кривой для ткани типа II. Существует примерно линейная зависимость между логарифмами нагрузки и времени до разрушения образца. Используя эту зависимость, можно с достаточной точностью экстраполировать результаты испытаний на время до 10^5 ч (около 11 лет) и таким образом определить нагрузку, не вызывающую разрушения материала в течение этого срока. Аналогичные зависимости получены и при испытании швов оболочек, что видно из рис. 11, относящегося к комбинированному шву для ткани типа II. Если при таких испытаниях определять удлинения ткани в момент разрушения, то обнаруживается, что их значения весьма близки к значениям кратковременных удлинений при разрыве и, по-видимому, не зависят от времени [7].

Длительные испытания материалов и швов необходимо проводить, естественно, не только при комнатной, но и при повышенной температуре. Поэтому полная программа испытаний (для четырех типов тканей и четырех типов швов), результаты которых здесь приводятся, оказалась весьма обширной и потребовала значительного времени для ее реализации.

В табл. 3 приведены экстраполированные до 10^5 ч характеристики длительной прочности тканей типов II и III и стандартных швов для этих тканей при комнатной температуре и при температуре 70°C [14, 15]. Там же приведены значения отношений длительной прочности к кратковременной, а также обратные им величины — «коэффициенты потерь», необходимые для расчета оболочек на прочность.

Таблица 3. Кратковременная и длительная прочность тканей с покрытием из ПВХ и их швов (по утку)

Ткань, швы	Тип ткани	Прочность, Н/см				Отношение длительной прочности к кратковременной, %, при температуре		Коэффициент потерь при температуре	
		кратковременная при температуре		длительная ¹ при температуре		кратковременной, %, при температуре		коэффициент потерь при температуре	
		комнатной	70 °С	комнатной	70 °С	комнатной	70 °С	комнатной	70 °С
Ткань	II	847	791	618	533	73	67	1,37	1,48
	III	1026	945	709	612	69	65	1,45	1,54
Швы:									
сварной (ВЧ)	II	802	695	426	194	53	28	1,88	3,58
	III	993	864	713	359	72	42	1,39	2,41
комбинированный	II	813	582	473	286	58	49	1,72	2,04
	III	962	683	345	267	36	39	2,79	2,56
замковый	II	470	372	301	307	64	83	1,56	1,21
	III	552	435	357	338	65	78	1,55	1,29
накладной четырехстрочный	II	550	447	405	382	74	85	1,36	1,17
	III	674	522	464	398	69	76	1,45	1,31

¹ Экстраполяция до 10⁵ ч.

Анализ результатов испытаний при температуре 70 °С показывает, что длительная прочность материала при этой температуре практически равна кратковременной прочности при комнатной температуре, умноженной на произведение понижающих коэффициентов, соответствующих длительной прочности при комнатной температуре и кратковременной прочности при 70 °С. Наличие такой закономерности позволяет отказаться от проведения длительных испытаний материала при повышенных температурах.

Кроме прочности при разрушении в условиях ползучести, важное значение могут иметь и другие характеристики ползучести материала. На рис. 12 показаны деформации ползучести ткани при длительной нагрузке. Как видно из рисунка, кривые ползучести в полулогарифмических координатах принимают постоянный положительный наклон сразу после достижения некоторого начального удлинения, причем этот наклон не зависит от нагрузки [16].

Испытания при повышенных температурах не обнаружили существенного увеличения скорости ползучести [7, 17]. Те же вязкоупругие свойства материала проявляются и при «обратных» условиях испытания, т. е. при заданном постоянном удлинении; в этом случае усилия (напряжения) в материале уменьшаются со временем, как показано на рис. 13, где приведены результаты испытаний при циклическом изменении температуры. Это явление релаксации напряжений означает с практической точки зрения необходимость «подтягивать» оболочку спустя некоторое время после ее возведе-

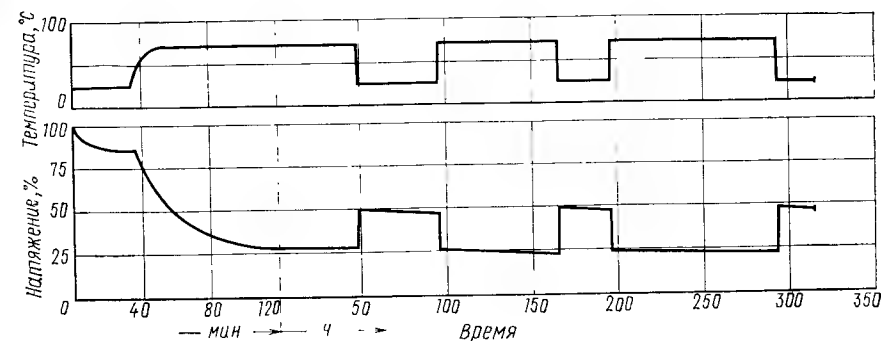


Рис. 13. Релаксация натяжений в ткани типа II с покрытием из ПВХ (по утку); начальное натяжение — 178 Н/см

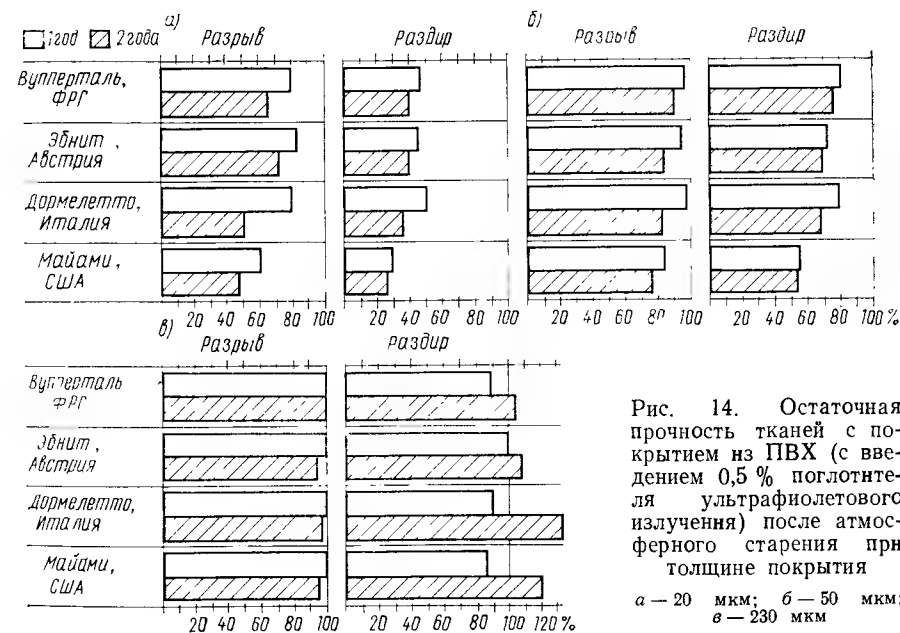


Рис. 14. Остаточная прочность тканей с покрытием из ПВХ (с введением 0,5 % поглотителя ультрафиолетового излучения) после атмосферного старения при толщине покрытия

а — 20 мкм; б — 50 мкм; в — 230 мкм

ния (примерно через сутки), чтобы восстановить первоначальный уровень натяжения, обеспечивающий стабильность конструкции¹. Если на сооружение действуют повышенные температуры, может оказаться необходимым повторно «подтянуть» оболочку после первого интенсивного теплового воздействия. В дальнейшем дополнительной корректировки натяжения оболочки уже не требуется.

В реальных условиях эксплуатации усилия в оболочке никогда

¹ Явление релаксации напряжений для воздухопорных оболочек нехарактерно в связи с отсутствием зависимости напряжений в оболочке от удлинений материала; «подтягивать» приходится только тентовые покрытия (Прим. ред.).

не остаются постоянными, в связи с чем возникает вопрос о том, как будет реагировать материал оболочки на переменные (повторные) нагрузки. Здесь могут быть рассмотрены два крайних случая: высокочастотная циклическая нагрузка, вызываемая сильными ветрами, и низкочастотная (длиннопериодная) нагрузка от снега. Оба вида воздействий подробно исследованы [7, 17, 18], причем было установлено, что длительная прочность и деформативность материала существенным образом зависят от верхнего уровня нагрузки, так что для надежной оценки этих характеристик можно использовать результаты испытаний материала при постоянном напряжении, соответствующем верхнему уровню действующих нагрузок.

Долговечность. Решающим фактором при решении практических задач является, конечно, устойчивость материалов оболочек к воздействиям среды, характерным для района строительства. Поскольку эти воздействия весьма широко изменяются для разных географических зон и их крайне трудно воспроизвести в лабораторном эксперименте, были своевременно организованы испытания материалов непосредственно в натурных условиях. Вначале такие испытания проводились только в Вуппертале (ФРГ); затем они были поставлены в Дормелетто (Италия), Эбните (Австрия), Тель-Авиве (Израиль) и Майами (США) [19, 20]. Результаты испытаний, представленные в обобщенном виде на рис. 14, показывают, что долговечность тканей существенным образом зависит от толщины покрытия в местах выступов переплетения нитей. Можно с уверенностью считать, что в этих местах толщина покрытия на экспонируемой (наружной) поверхности ткани должна быть не менее 150 мкм; при этом потеря прочности ткани не будет превышать примерно 10 %.

Теплофизические характеристики. Как уже было отмечено, в связи с чрезвычайно быстрым ростом стоимости энергии теплоизоляционные свойства материалов оболочек приобрели роль важнейшего фактора при применении воздухоопорных конструкций для зданий, требующих отопления и кондиционирования воздуха. Теплоизоляционные свойства ограждающих конструкций характеризуются коэффициентом теплопередачи K [21], показывающим, какое количество тепловой энергии передается в единицу времени через заданную площадь поверхности ограждения. Для тканей с покрытием из ПВХ значение K составляет 5,7 Вт/(м²·К) [22], что намного превышает соответствующие значения для традиционных строительных материалов. Столь значительная теплопроводность тканевых материалов является, если не принять специальных мер, серьезным препятствием для их использования в оболочках плавательных бассейнов, выставочных павильонов и т. п. Менее существенны теплоизоляционные свойства материалов оболочек для таких сооружений, как, например, склады разного рода продукции, нечувствительной к температурному режиму хранения.

Существует ряд способов улучшения теплотехнических свойств пневматических оболочек, например нанесение на ткань вспененно-

го теплоизоляционного материала [22] или устройство многослойных оболочек [23]. Общие критерии для оценки эффективности таких способов отсутствуют, и вопрос об их использовании должен решаться по существу в каждом конкретном случае.

Огнестойкость. Как и для других полимерных материалов, для тканей с покрытием из ПВХ горючесть является важной характеристикой при их применении в строительстве. В отличие от аналогичных импрегнированных тканей общетехнического назначения, ткани с покрытием из ПВХ для строительных конструкций выпускают со специальными flame-retarding добавками и, таким образом, удовлетворяют требованию трудносгораемости, содержащемуся в нормах ряда стран [24, 25]. В качестве таких добавок используют вводимые в массу покрытия соединения типа диоксида сурьмы или специальные фосфорсодержащие пластификаторы. Вид материала подложки играет лишь второстепенную роль [22]; например, стеклоткань с покрытием из ПВХ не обладает существенно более низкой степенью горючести по сравнению с тканями из синтетических волокон. Дополнительная огнезащитная обработка материала в большинстве случаев вообще не является необходимой, поскольку по действующим противопожарным нормам требуется лишь, чтобы повреждение материала при пожаре ограничивалось зоной непосредственного воздействия огня и горение не распространялось по материалу оболочки за пределы этой зоны. В тех особых случаях, когда требуется полностью исключить любую возможность возгорания оболочки, может оказаться необходимым применение других материалов, например стеклотканей, покрытых политетрафторэтиленом.

Стойкость к загрязнению. Как показали испытания в различных климатических зонах [20], все материалы оболочек подвержены более или менее значительному загрязнению. В воздухоопорных конструкциях такое загрязнение наблюдается уже после относительно короткого срока эксплуатации, поскольку вследствие миграции пластификатора из массы покрытия его наружная поверхность становится липкой. При этом такое широко применяемое средство, как покрытие материала оболочки лаками, оказывается малоэффективным; некоторую защиту от загрязнения обеспечивает только нанесение поверхностного покрытия из поливинилфторида [22]. Следует, однако, иметь в виду, что нанесение на материал оболочки любых дополнительных покрытий значительно затрудняет все операции с ним, делает невозможной сварку швов и, таким образом, допускает устройство только шитых соединений.

В редких случаях, в частности в условиях влажного климата, на поверхности оболочек может наблюдаться появление плесени, что также связано с присутствием пластификаторов, даже если в массу ПВХ введена добавка фунгицида.

Как загрязнение, так и образование плесени практически не влияют на эксплуатационные свойства оболочек и сказываются лишь на их внешнем виде, что, впрочем, может быть весьма неже-

лательным для сооружений, рассчитанных на определенный архитектурный эффект.

Учет свойств материала при расчете оболочек. Рассмотрев свойства импрегнированных материалов для мягких оболочек, перейдем к использованию полученных выше результатов в расчетах пневматических (воздухоопорных) конструкций.

В ранних работах по данному вопросу [3, 7] устанавливался максимальный уровень натяжения оболочки σ_a , превышение которого не допускалось ни при каких обстоятельствах:

$$\sigma_a = \sigma_0 / \left(S \prod_{i=1}^5 A_i \right),$$

где σ_0 — кратковременная разрывная прочность материала; S — коэффициент безопасности; A_i — «коэффициенты потерь», учитывающие снижение прочности материала вследствие длительного действия нагрузки (A_1), двухосного напряженного состояния (A_2), повышенных температур (A_3) и факторов, вызывающих старение материала (A_4), а также изменчивость условий обработки материала и изготовления оболочек (A_5).

Впоследствии было найдено, что такой подход является слишком грубым, так как основывается на предположении, что конструкция в течение всего времени эксплуатации подвергается действию максимального ветрового давления и повышенной температуры. Поэтому был предложен метод расчета, позволяющий более корректно учитывать реальный режим эксплуатации конструкций [4] и устанавливающий следующие предельные условия для трех основных сочетаний нагрузок (воздействий).

1. Усилия при нормальной температуре, вызываемые номинальным внутренним давлением в оболочке и ветровой нагрузкой:

$$1,1\sigma_{pi} + 1,6\sigma_w \leq \sigma_{a0},$$

где σ_{pi} — натяжение оболочки от внутреннего давления; σ_w — то же, от ветра; σ_{a0} — максимально допускаемое натяжение материала, определяемое с учетом коэффициентов A_2 и A_4 .

2. Усилия при максимальной температуре, вызываемые номинальным внутренним давлением и ветровой нагрузкой:

$$1,1\sigma_{pi} + 0,6\sigma_w \leq \sigma_{aT},$$

где σ_{aT} — допускаемое натяжение материала, определяемое с учетом коэффициентов A_2 , A_3 и A_4 .

3. Длительно действующие усилия:

$$1,3\sigma_{pi} \leq \sigma_{at},$$

где σ_{at} — допускаемое натяжение материала, определяемое с учетом коэффициентов A_1 , A_2 , A_3 и A_4 .

Коэффициенты в левой части предельных условий установлены исходя из требований надежности [26], на основании статистического анализа метеорологических данных, а также с учетом неизбежной изменчивости условий обработки материала и изготовления конструкций. Поэтому указанные условия уже не содержат коэффициента A_5 , который ранее учитывался в расчетах.

При решении практических задач расчета следует обеспечивать одновременное выполнение всех трех приведенных выше предельных условий. Значения σ_{pi} и σ_w определяются из статического расчета оболочки, а значения σ_{a0} , σ_{aT} и σ_{at} могут быть приняты по официальным нормативным документам, регламентирующим характеристики материалов для пневматических конструкций и разработанным на основе испытаний, подобных описанным в разделе «Свойства тканей с покрытием из ПВХ». Значения допускаемых напряжений для материалов типа I и II (см. табл. 1) и для различных типов швов оболочек из этих материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Допускаемые напряжения для тканей и их швов, Н/см

Ткани, швы	Ткань типа II			Ткань типа III		
	σ_{a0}	σ_{aT}	σ_{at}	σ_{a0}	σ_{aT}	σ_{at}
Ткани	400	360	235	480	440	275
Швы:						
сварной (ВЧ)	325	270	100	405	335	180
комбинированный	260	185	90	305	220	80
замковый	150	115	65	175	135	80
накладной четырехстрочный	175	145	90	215	165	100

Заключение. Хотя применение методики расчета, изложенной выше, должно было бы гарантировать полную надежность воздухоопорных конструкций, на практике все же наблюдаются повторяющиеся случаи их разрушения. Анализ разрушений [10] показывает, что более чем в 80 % всех случаев они не являются прямым следствием разрушения материала оболочек, а связаны с такими факторами, как неудовлетворительное обслуживание, несоблюдение установленных нормами расстояний между сооружениями и т. д. При этом оболочки, как правило, разрушаются полностью — свидетельство того, что их сопротивление раздиру недостаточно для локализации местных повреждений. Ситуация осложняется еще и тем, что сопротивление раздиру тканей с покрытием из ПВХ существенно снижается при низких температурах [10, 27, 28]; это снижение вызывается высоким содержанием пластификаторов в массе покрытия. Рекламируемые на рынке так называемые «морозостойкие» покрытия из ПВХ неэффективны и, более того, вообще не должны применяться в связи с их низкой огнестойкостью. Сопротивление тканей раздиру может быть повышено при использовании специальной технологии их изготовления, например путем введения в полиэфирную ткань волокна «арамид». При этом повышение прочности при раздире доходит до 50 %, однако чувствительность материала к низким температурам сохраняется, хотя и в несколько меньшей степени. Радикальным решением проблемы было бы применение материалов покрытий, вообще не содержащих пластификаторов, но принадлежащих, подобно ПВХ, к классу термопластов, так как только тогда материал обо-

лочки будет так же легко перерабатываться. Некоторые обнадеживающие шаги в этом направлении уже сделаны [29, 30]. Можно рассчитывать, что применение новых покрытий позволит одновременно решить и проблему предотвращения загрязнений оболочек.

Подводя итог сказанному, выразим надежду, что уже в ближайшем будущем мы будем иметь новые материалы для покрытий, свободные от недостатков, свойственных покрытиям из ПВХ из-за высокого содержания в них пластификаторов, но в той же степени удобные и экономичные в переработке. При этом можно ожидать удорожания материала примерно на 20 %; однако, если учесть одновременное повышение его качества и относительно малую долю стоимости материалов оболочек в общей стоимости сооружений, такое удорожание наверняка окажется не слишком обременительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Schlaich, K. Kleinhanss, K. Gabriel. — Symp. «Beschichtete Chemiefasergewebe 1979», Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, F. R. Germany, p. 2.1.
2. H. Mewes. Producing and Properties of Coated Fabrics for Pneumatic Structures. Research Report IASS — Working Group of Pneumatic Structures 1978, p. 19.
3. W. Krummheuer. Mechanical Properties of PVC-Coated Fabrics and their Joints. Journal of Coated Fabrics 8 (1979) 302.
4. Zulassungsbescheid Z-10.5-27 des Institutes für Bautechnik, Berlin, vom 3. Sept. 1979 für «PVC-beschichtete Polyestergerewebe für Tragluftballonbauten».
5. M. H. Losch. Bestimmung der mechanischen Konstanten für einen zweidimensionalen nicht linearen, anisotropen elastischen Stoff am Beispiel beschichteter Gewebe. Diss. Universität Stuttgart, F. R. Germany (1971).
6. B. Meffert. Verhalten von PVC-beschichteten Textil-Geweben. Spannungs-, Deformations- und Versagensverhalten PVC-beschichteter Polyestergerewebe unter einachsiger und biaxialer Beanspruchung. 1. Intern. Symp. «Weitgespannte leichte Flächentragwerke». Stuttgart, F. R. Germany, April 1976, Vol. 2.
7. B. Meffert. Mechanische Eigenschaften PVC-beschichteter Polyestergerewebe. Diss., RWTH Aachen, F. R. Germany, 1978.
8. G. Rehm, R. Münsch. Zweiachsige Langzeit-Zugversuche an PVC-beschichteten Polyestergereweben. 2. Intern. Symp. «Weitgespannte leichte Flächentragwerke», Stuttgart, F. R. Germany, May 1979, Vol. 1.
9. H. W. Reinhard. Zweiachsige Prüfungen an textilen Geweben mit besonderer Berücksichtigung von Zeitenflüssen auf das mechanische Verhalten. 1. Intern. Symp. «Weitgespannte leichte Flächentragwerke», Stuttgart, F. R. Germany, April 1976, Vol. 2.
10. W. Krummheuer. Haft- und Weiterreißfestigkeit bei PVC — beschichteten Polyestergereweben. Symp. «Beschichtete Chemiefasergewebe 1979». Institut für Kunststoffverarbeitung RWTH Aachen, p. 5.1.
11. H. Blumberg. Eurofabric 1979, edited by: Enka AG, Wuppertal, F. R. Germany.
12. B. Meffert. Festigkeits- und Weiterreißfestigkeitsprobleme bei beschichteten Geweben. 2. Intern. Symp. «Weitgespannte leichte Flächentragwerke». Stuttgart, F. R. Germany, 1979, Vol. 2.
13. H. Minami. Strength of Coated Fabrics with Crack Technical R & D Dept. Report edited by: Taiyo Kogyo Co., Ltd., Tokyo and Osaka, Japan.
14. K. Strack, F. J. Günther. Tragverhalten von Nahtverbindungen bei Bauwerken aus PVC-beschichteten Polyestergereweben. Gewebe, Hochfrequenz-

Schweißnähte und Kombinationsnähte. Symp. «Beschichtete Chemiefasergewebe 1979». Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, F. R. Germany, p. 6.

15. U. Schulz. Tragverhalten von Nahtverbindungen bei Bauwerken aus PVC-beschichteten Polyestergereweben. Nähverbindungen. Symp. «Beschichtete Chemiefasergewebe 1979». Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, F. R. Germany p. 6—27.

16. H. Blumberg, W. Krummheuer, J. Nebe. Zeitstandverhalten von PVC-beschichteten Polyamid 6.6- und Polyestergereweben in Praxis- und Laborprüfung. Kunststoffe 66 (1976) 2.

17. W. Krummheuer. Das mechanische Verhalten von PVC — beschichteten Polyestergereweben sowie deren Nahtverbindungen unter konstanter und intermittierender Last. 1. Intern. Symp. «Weitgespannte leichte Flächentragwerke», Stuttgart, F. R. Germany, 1976, Vol. 2.

18. H. Blumberg, W. Krummheuer. Das Verhalten von PVC — beschichteten Polyestergereweben bei intermittierender Belastung. Kunststoffe 67 (1977) 772.

19. H. Blumberg. Eurofabric 1978, edited by: Enka AG, Wuppertal, F. R. Germany.

20. W. Krummheuer. Light Resistance of Industrial Polyester and Polyamide 6.6 Yarns and of PVC-Coated Fabrics made from these Yarns, presented at CPAI — Coaters and Laminators Meeting. Aug. 1980, New York, N. Y. USA.

21. Deutsche Industrie-Norm 4104.

22. W. Krummheuer. Development Activities of the Industrial Yarns Institute for Coated and Rubberized Fabrics. Journal of Coated Fabrics 8 (1978) 54.

23. J. Linecker. Mehrschichtige Membrankonstruktionen zur Energieeinsparung und gewinnung in Membrankonstruktionen, edited by E. Bubner et al. Verlags-gesellschaft W. Müller GmbH, Köln, 1979.

24. Deutsche Industrie-Norm 4102.

25. Norme française enregistrée NF P 92—507.

26. G. König, M. Heunisch. Gutachterliche Stellungnahme, Teil 1 und 2. «Zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für den Standsicherheitsnachweis von Tragluftbauten», Januar 1979. AZ: G 78 106, ordered by: Güteüberwachungs-gemeinschaft Membrankonstruktionen e. V., Bad Vilbel 1.

27. W. Krummheuer. Eurofabric 1978, edited by: Enka AG, Wuppertal, F. R. Germany.

28. V. V. Yermolov, S. B. Voznesensky. Air — Supported Structures in Severe Winter Conditions IASS — Working Group of Pneumatic Structures 1978, p. 171.

29. W. Krummheuer. Eurofabric 1980, edited by: Enka AG, Wuppertal, F. R. Germany.

30. W. Krummheuer. Technical Developments in Western Europe in the Field of Coated Industrial Fabrics presented at: CPAI — Textile Technology Forum. Oct. 1980, Reno, Nevada, USA.

СТЕКЛОТКАНЬ, ПОКРЫТАЯ ТЕФЛОНОМ, — УНИКАЛЬНЫЙ НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ТКАНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ

У. У. Бэрд (США)

Хотя тканевые сооружения сравнительно недавно начали использоваться в качестве стационарных строительных форм, новое их поколение открывает в настоящее время новую страницу в истории строительства. Их быстрое признание оказалось возможным благодаря созданию уникального строительного материала — стеклоткань.

© Walter W. Bird, 1983.

ни, покрытой тефлоном, — который был разработан специально для больших тканевых покрытий. За последние восемь лет из этого материала было построено более 20 крупных сооружений. Несколько других крупных проектов будут завершены в ближайшее время. Новое поколение сооружений включает в себя такие выдающиеся объекты, как тентовые конструкции студенческого центра и драматической студии колледжа в Ла Верне, пневматические покрытия студенческого центра в колледже Санта-Клара, стадиона «Юни-дом» университета на севере Айовы, импозантного «Силвердома» в Понтиаке (Мичиган) — одного из крупнейших в мире крытых стадионов, вмещающего свыше 80 тыс. зрителей. Все эти сооружения покрыты воздухоопорными оболочками. Центр отдыха в Ганноверском парке — другой выдающийся пример тентовой конструкции, поддерживаемой жесткими арками.

Здания центра отдыха студентов в новом университете в Эр-Рияде, смонтированного в 1976 г., и Центра приема паломников Хадж площадью 418 050 м², строящегося в Джидде (оба в Саудовской Аравии), демонстрируют выдающиеся эксплуатационные качества этого уникального нового материала, находящегося в неблагоприятных климатических условиях. К более поздним объектам относятся эффектное здание Флоридского фестиваля в Си Уорлде, Орlando (Флорида) — красивое тканевое сооружение, укрывающее экзотические магазины и сады, а также новый стадион и спортивный центр университета в Сиракьюсе. Новый стадион сооружается сейчас в Миннеаполисе, другие стадионы проектируются для Ванкувера (Британская Колумбия), Такомы (Вашингтон) и Индианаполиса (Индиана).

Помимо сооружений спортивного и рекреационного назначения, где популярность нового материала уже не вызывает сомнений, он используется в настоящее время для тканевых покрытий, укрывающих магазины розничной торговли, таких как большой пролет новых магазинов Баллока в Сан-Хосе и на острове Маринер (оба в Калифорнии). Фирма «Бэрдэйр» работает в настоящее время над проектом укрытия торгово-прогулочного центра в Майами.

Выдающиеся эксплуатационные качества этого уникального материала быстро завоевывают признание во всем мире применительно к стационарным тканевым сооружениям больших пролетов.

Предварительные сведения. Тканевые сооружения не являются новинкой. Первый воздухоопорный купол-обтекатель для радиолокационной антенны был установлен в 1948 г. С тех пор автор имел возможность демонстрировать исключительные свойства воздухоопорных и тентовых сооружений на примерах многих объектов. После основания в 1956 г. фирмы «Бэрдэйр» предусматривались различные направления использования этих сооружений в строительстве, а также рассматривались потенциальные возможности большепролетных воздухоопорных покрытий применительно к крупным сооружениям, предназначенным для отдыха и спорта. Однако полное признание тканевых сооружений могло произойти только с помощью новаторского творчества архитекторов и инже-

неров, заинтересованных в новых разработках и новой технологии. Чтобы поддержать идею применения тканевых конструкций в строительстве, автор часто делал доклады на специализированных совещаниях и симпозиумах, а также консультировал архитекторов и инженеров, интересовавшихся новой техникой.

Главным способом доказать реальность применения тканевых сооружений в области архитектуры была разработка проектов выставочных и зрелищных зданий. Такие сооружения, как «Пентадом» и выставочный павильон «Атомы для мира», созданные в первые годы существования фирмы, вызвали огромный интерес к пневматическим конструкциям. Однако реальная возможность совместной работы с архитекторами над новыми проектами была сначала связана с всемирными ярмарками и выставками. В данном случае и архитектор, и экспонент были заинтересованы в новом, необычном и захватывающем решении, чтобы привлечь внимание посетителей. Требования строительных правил были менее жесткими, а долговечность материала имела не столь большое значение вследствие временного характера сооружений. Фирма «Бэрдэйр» на Всемирной ярмарке в Нью-Йорке в 1964 г. смонтировала 14 сооружений. Наш павильон провинции Онтарио на всемирной выставке ЭКСПО-67 в Монреале был выдающимся примером крупного тентового сооружения. В павильоне ФРГ, созданном Ф. Отто, использовался тент с придерживающей тросовой сетью.

Выставка ЭКСПО-70 в Японии была поистине тканевой страной чудес. Многие из павильонов имели тканевую конструкцию. Архитекторы и инженеры всего мира содействовали появлению многих уникальных решений. Фирма «Бэрдэйр» выступала в роли консультанта архитекторов Дэвиса и Броуди, авторов павильона США на выставке ЭКСПО-70. Когда их оригинальное первоначальное решение было отклонено в связи с урезанным бюджетом, выделенным законодательными органами, мы предложили свое решение в виде воздухоопорного купола с низким силуэтом, усиленного канатами. Однако из-за плохих грунтовых условий на участке применить обычную анкеровку было невозможно, и Д. Гейгер, который был инженером-конструктором первоначального проекта, предложил использовать сжатое кольцо и диагонально размещенные канаты, чтобы снизить стоимость анкеров. Фирма «Бэрдэйр» разработала основное решение тканевой крыши и технические требования к материалу, выбрав специальный материал из стеклоткани, покрытой ПВХ, который был успешно применен для оболочки павильона провинции Онтарио на выставке ЭКСПО-67, а также для других более ранних сооружений.

Исключительный успех павильона США на выставке ЭКСПО-70 и признание его возможностей как большепролетного сооружения вызвали огромный интерес к стационарным большепролетным тканевым конструкциям. Однако успех этого сооружения показал необходимость улучшения эксплуатационных качеств материала, в особенности его долговечности и невозгораемости, с целью получения признания со стороны заказчиков и должностных лиц, свя-

занных со строительством. В то время как при разработке мобильных пневматических сооружений, используемых сезонно, или временных сооружений на выставках и ярмарках допускались отклонения от требований строительных правил, для большинства постоянных сооружений, в особенности для тех, которые использовались как места сбора людей, требовалось соответствие обычным строительным правилам.

К счастью, д-р Г. Горес из Лаборатории средств обучения некоторое время интересовался применением крупных тканевых сооружений как укрытий низкой стоимости для учебных целей. Фирма «Бэрдэйр» в тесном содружестве с д-ром Горесом разработала ряд экспериментальных сооружений для использования в школах. Д-р Горес пришел в восторг от приятного освещения интерьера громадных воздухоопорных сооружений с их полупрозрачной крыши и естественным дневным освещением и сказал, что они создают иллюзию «участка неба» или «частицы лета». Он был восхищен возможностями, предоставляемыми такими сооружениями, как павильон США, и согласился содействовать поискам новых материалов, которые могли бы обеспечить улучшение необходимых качеств сооружений.

Поиски привели к фирмам «Дюпон тефлон» и «Кемикэл фэбрикс корпорейшн», которые разработали материал из стеклоткани, покрытой тефлоном, предназначенный для использования в конвейерных лентах и для других технических целей. В то время как физические свойства доступных в то время материалов не отвечали требованиям, предъявляемым к строительным материалам, сочетание тефлона и стеклоткани, как казалось, давало возможность обеспечить повышенную долговечность и огнестойкость.

Стекло в виде волокон является исключительно удачным вариантом силовой основы материала. Оно имеет такую же удельную прочность¹, что и сталь. К тому же оно нескорогаемо и выдерживает повышенные температуры, требующиеся при совмещении с большинством нескорогаемых смол. Тефлоновые (фторсодержащие) полимерные смолы являются наиболее химически инертными пластмассами и особенно примечательны тем, что хорошо противостоят ультрафиолетовому излучению, влажности и смогу находясь на открытом воздухе. Существенной потери прочности не наблюдалось даже в тонких пленках тефлона после 15-летней экспозиции под открытым небом.

Огнестойкость тефлона также исключительна. Он не поддерживает горение в атмосфере, содержащей менее 98 % кислорода, и даже при прямом воздействии пламени продукты его распада не создают плотного дыма, характерного для большинства пластмасс, основой которых являются углеводороды. Фторополимеры также обладают существенно меньшей теплотой сгорания, чем углеводородные полимеры. Кроме того, сравнительно тонкое покрытие обеспечивает высокое светопропускание, а также эффективное само-

очищение. Почти ничто не пристаёт к тефлону. В конечном счете можно ожидать, что и светопропускание, и огнестойкость могут быть сохранены неопределенно долго, так как эти свойства присущи самой пластмассе и не зависят от добавок, которые могут давать выцветы на поверхности, окисляться, вымываться водой или подвергаться воздействию микроорганизмов. Таким образом, инертность тефлона удачно дополняет прочность и невозгораемость стекловолокна.

Для испытания и оценки были изготовлены образцы ткани. Испытания первых образцов показали, что они имеют низкое сопротивление сгибам и сминанию в складках и обычно не годятся для применения в строительстве. Было признано, что необходимы совместные усилия специалистов, имеющих опыт в этой области, чтобы разработать материал, обладающий нужными свойствами. В то время Джон Шейвер работал над проектом двух тканевых сооружений, для которых ему нужен был материал повышенного качества, в связи с чем возникла необходимость в ускоренной разработке материала, чтобы не была упущена возможность создания указанных сооружений из-за недостатка подходящего материала. С этой целью фирма «Бэрдэйр» объединилась с фирмой «Кемикэл фэбрикс корпорейшн» и при содействии главных поставщиков сырья — фирм «Дюпон» и «Оуэнс-Корнинг файберглас» — разработала долговечную ткань строительного назначения, получившую наименование «ширфилл»¹.

Разработка уникального нового материала. При разработке композиций тефлона и стекловолокна необходимо было узнать особые свойства каждого материала и познакомиться с ними на практике. Хрупкость стекловолокна, без всякого сомнения, связана с присущими ему высокими прочностью и модулем упругости. Требовалось также разработать метод соединения тканевых полотнищ в крупные элементы мягкой оболочки, при этом с той же конструктивной целостностью, что и сама ткань.

Чтобы гарантировать предельную гибкость нити, испытание на хрупкость проводилось с использованием наиболее тонкого из возможных волокон типа «бета» диаметром 3,8 мкм. Опыт работы фирмы «Бэрдэйр» над предыдущими объектами показал, что ткань из «бета» выдерживает изгиб и сминание в складку, возникающие при изготовлении и возведении сооружения, гораздо лучше, чем из пряжи типа C и DE. Для обеспечения требований прочности нити были сложены и переплетены в полотняную ткань, однако с большим числом просветов и достаточной волнистостью, чтобы увеличить удлинение, прочность на растяжение и светопропускаемость ткани с покрытием. Ткань была впоследствии подвергнута тепловой усадке и обработана патентованной отделкой для предотвращения проникания в пряжу воды, снижения самоистирания и повышения прочности материала на раздир.

¹ Подразумевается отношение предела прочности к плотности (Прим. ред.).

¹ Технические данные по ширфиллу предоставлены д-ром Дж. А. Эффенбергером, фирма «Кемикэл фэбрикс корпорейшн».

Чтобы улучшить качество покрытия и избежать «булавочных отверстий» и трещин высыхания, которые преобладали в ранних образцах, фирма «Кемикэл фэбрикс корпорейшн» разработала специальную патентованную смесь, применение которой содействовало закрытию просветов между нитями тяжелой ткани, необходимой для оболочек сооружений. Для повышения прочности во влажном состоянии и изгибаемости материала с целью увеличения его сопротивления повреждениям во время изготовления и установки сооружения, а также удлинения срока его службы использовались специальные методы предварительной обработки и покрытия.

При исследовании нового материала был использован опыт фирмы «Бэрдэйр» в разработке материалов для куполов-обтекателей и выставочных сооружений прежних лет. Были установлены минимальные требования и разработана методика испытаний для оценки свойств материалов при изготовлении сооружения, его транспортировке и возведении. Фирма «Бэрдэйр» разработала специальное сварочное оборудование, необходимое для обеспечения надежной техники сварки. Конструкция сварного шва предусматривает повышенную прочность и надежность.

В результате выполнения этой программы был создан материал, который не только имел высокую прочность и эксплуатационные качества, требующиеся для больших оболочек, но и обладал исключительной огнестойкостью, долговечностью не менее 20 лет и многими другими свойствами, делающими его идеальным для применения в качестве покрытий. Успех выполнения программы дал возможность группе исполнителей работать в тесном сотрудничестве с архитекторами и инженерами при разработке детального решения таких сооружений, в которых были бы учтены уникальные свойства данного материала. Новые материалы успешно использовались в воздухоопорном покрытии площадью 3730 м² колледжа в Миллигене и в сооружениях для колледжа в Ла Верне площадью 5600 м². Это первые крупные сооружения, изготовленные из ширфилла, — стеклоткани строительного назначения, покрытой тефлоном и специально разработанной для мягких оболочек.

В значительной мере успех этой разработки следует отнести на счет д-ра Гарольда Гореса из Лаборатории средств обучения и архитектора Джона Шейвера, которые обеспечили сотрудничество д-ра Джесси Джонсон из колледжа в Миллигене и д-ра Ли Ньюкамберла из колледжа в Ла Верне. Последние на свой страх и риск предложили использовать свои лаборатории, чтобы проверить преимущества новой технологии. Их участие было решающим для успеха выполнения нашей программы.

Свойства стекловолокна, покрытого тефлоном. Механические свойства ширфилла приведены в табл. 1. Поскольку для тентовой конструкции, смонтированной в Ла Верне, требовалась более прочная ткань, чем для воздухоопорного сооружения колледжа в Миллигене, вначале выпускали ткань двух разных прочностей и масс. Следует отметить, что в табл. 1 приведены минимальные требуемые значения. Прочность на растяжение выпускаемого материала,

Таблица 1. Типовые технические условия некоторых строительных тканей

Показатель	Ширфилл I	Ширфилл II	Фэбрасорб
Масса, кг/м ²	1,53	1,27	0,45
Толщина, мм	0,97	0,81	0,36
Прочность на растяжение, кН/м:			
по основе	143	93	57
по утку	125	77	41
Прочность на изгиб — перегиб, кН/м:			
по основе	125	79	48
по утку	107	64	36
Прочность на раздир, кН:			
по основе	0,272	0,159	0,091
по утку	0,363	0,172	0,082
Сопротивление распространению раздира при двухосной нагрузке, кН	0,14	0,11	—
Адгезия к покрытию, кН/м:			
тип средняя	2,7	2,3	0,7
тип одиночная	1,8	1,8	0,7

определенная испытанием полосы, на 15—20 % выше требуемой. Нижние пределы требований были вначале установлены для того, чтобы учесть отклонения, неожиданно возникавшие при выпуске партий продукции прежних лет, в то время, когда техника нанесения покрытия и оборудование еще только разрабатывались. Более высокие требования будут установлены по мере подтверждения их опытом производства. Среди других выдающихся свойств данного материала можно отметить следующие.

Погодостойкость. Это качество было оценено как в результате ускоренных испытаний с помощью везерометра, так и путем продолжительной натурной экспозиции материала на разных метеорологических станциях. Ускоренные испытания проводились в нескольких лабораториях периодами до 8000 ч. Приведенные в табл. 2

Таблица 2. Ускоренные испытания погодостойкости ширфилла

Время проведения испытаний	Прочность на растяжение по основе, кН/м	
	ширфилл I	ширфилл II
До начала испытаний	175	98
После 1000 ч	197	106
» 2000 ч	—	93
» 4000 ч	183	—
» 8000 ч	178	91

данные показывают, что вполне реально ожидать сохранения тканью требуемых конструктивных свойств в течение 20 с лишним лет. Однако только естественная экспозиция определит предельную долговечность. Длительные испытания продолжаются под руководством фирм CHEMFAB и «Дюпон». Первые образцы материала,

Таблица 3. Полевые испытания погодостойкости ширфилла

Время проведения испытаний	Прочность на растяжение по основе, кН/м			
	во Флориде		в Мичигане	
	ширфилл I	ширфилл II	ширфилл I	ширфилл II
До начала испытаний	142	98	142	98
После 6 мес	166	100	170	109
» 54 мес	135	98	141	111

размещенные на метеостанциях во Флориде и Мичигане, имеют тенденцию к достижению исключительной долговечности (табл. 3). Результаты испытания образцов материала, взятых из оболочек в местах первоначальной их установки в колледже штата Мичиган после 5 лет службы, не показали значительного снижения прочности.

Устойчивость к загрязнению и выцветанию. Тефлоновое покрытие после соединения его с тканевой основой имеет светлый рыжевато-коричневый цвет. Однако сам тефлон по своей природе, светлый, и после недолгого облучения покрытия прямым солнечным светом происходит его обесцвечивание, в результате чего материал приобретает красивый матовый белый цвет. Поскольку тефлон инертен и не подвержен влиянию большинства химических и промышленных загрязняющих веществ, он остается чистым и белым; пыль и грязь, которые могут на нем скапливаться, легко смываются во время дождя, причем сам материал остается чистым и привлекательным на вид. Сооружения колледжа в Ла Верне, размещенные в зоне смога Лос-Анджелеса, до сих пор имеют такую же чистую белую поверхность, какая была после их установки около восьми лет назад. Для сравнения ширфилла с полиэфирной тканью, покрытой поливинилхлоридом, можно сопоставить покрытие спортивного зала университета в Санта-Клара, возведенного рядом с плавательным бассейном, который сезонно укрывается оболочкой из полиэфирной ткани, покрытой поливинилхлоридом (рис. 1). Оба сооружения при их установке имели одинаковый белый цвет. Однако поскольку в поливинилхлорид для обеспечения требуемой гибкости и для улучшения других свойств вводят пластификаторы, выцветающие под длительным воздействием факторов светопогоды и собирающие пыль, поверхность оболочки сильно обесцвечивается. Тефлон же стоек к ультрафиолетовому облучению, гибок и не требует пластификаторов. Поэтому он не портится и сохраняет чистую поверхность.

Высокий модуль упругости, стабильность размеров. Тканевая основа из стекловолокна представляет собой сложный материал со сравнительно высоким модулем упругости. Стекловолокно обладает малой растяжимостью, и упругость материала должна быть достигнута за счет конструкции пряжи самой ткани. Эффективный модуль упругости составляет 900—1070 кН/м при коэффициенте Пу-

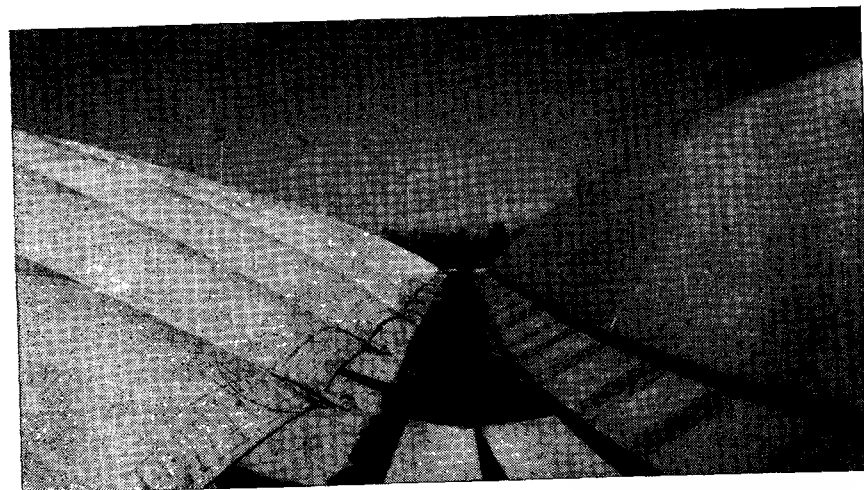


Рис. 1. Внешний вид воздухоопорных оболочек университета в Санта-Клара после 5 лет службы

слева — покрытие бассейна из полиэфирной ткани, покрытой поливинилхлоридом; справа — покрытие спортивного зала из ширфилла

ассона, равном 0,8—0,9. Стеклоткань отличается также высокой стабильностью размеров при переменных температуре и влажности. Поскольку точка плавления термопластичных компонентов превышает 315 °С, механические свойства в области используемых температур в высшей степени стабильны.

Огнестойкость. Строительные правила США обычно требуют, чтобы материалы, используемые в постоянных сооружениях, отвечали строгим требованиям пожарной безопасности. Хотя было разработано много самозатухающих тканей и были представлены доказательства, что воздухоопорные сооружения в высшей степени безопасны в пожарном отношении, это не удовлетворило большинство должностных лиц. Поэтому особого внимания заслуживает то, что мягкие оболочки строительного назначения из ширфилла завоевали признание даже при учете наиболее строгих требований строительных правил США и были утверждены для каждого из представленных на рассмотрение сооружений, в большинстве которых предусматривалось значительное скопление людей. Ни в одном случае не потребовалось какого-либо изменения, обусловленного тем, что сооружение было сконструировано в большей части из мягких, а не из обычных материалов.

По-видимому, наиболее убедительным испытанием, выполненным для подтверждения выдающейся огнестойкости ширфилла, было тоннельное испытание¹, проведенное по американскому стандартному методу ASTM-E-84. Оно применяется Ассоциацией национальной пожарной защиты для того, чтобы оценить материалы в

¹ Соответствует методу огневой трубы (Прим. ред.).

отношении их безопасности для жизни людей (NFPA 101). При проведении испытания по этому методу асбестоцементной доске дается показатель распространения пламени, равный 0, а полу из красного дуба — 100. Материалам с показателем ниже 25 присваивается класс А. Производятся также замеры дымовыделения и учет требуемого топлива.

При таком серьезном испытании тефлоно-стеклотканевые материалы, применяемые в постоянных сооружениях, включая ширфилл и фэбрасорб, относятся к классу А и являются, по-видимому, единственными техническими тканями, имеющими такой класс (табл. 4).

Таблица 4. Огнестойкость ширфилла и фэбрасорба в условных единицах (тоннельные испытания по ASTM E-84)

Материал	Распространение пламени	Требуемое топливо	Плотность дыма
Пол из красного дуба	100	100	100
Асбестоцементная доска	0	0	0
Ширфилл I	10	0	10
Ширфилл II	5	0	10
Фэбрасорб	5	0	5
S-4X	5	0	0

Акустические свойства. Эти свойства для любого крупного купольного сооружения требуют специального рассмотрения. Оболочки ранних сооружений в Миллигене и Санта-Клара не подвергались специальной обработке, однако к оболочке в Миллигене позднее была добавлена акустическая подшивка. Стадион в Понтиаке был сооружен со звукопоглощающими стеклотканевыми панелями на наклонных верхних стенах. Кроме того, к канатам были подвешены звукопоглощающие полотнища. Акустические свойства этого стадиона оказались исключительно хорошими для такого крупного сооружения.

В покрытии стадиона университета на севере Айовы («Юни-дом») под панелями оболочки по ее краям была применена пористая термоакустическая подшивка из стеклоткани, покрытой тефлоном. Это дало хорошие результаты. Аналогичная обработка проводилась в покрытии «Дакота Дом» университета в Южной Дакоте. Полная теплоакустическая обшивка использовалась на стадионах Флоридского университета в Гейнсвилле и Тампа, а также на новом стадионе Сиракьюсского университета, построенного в 1980 г. Фирма CHEMEFAB предложила этот материал под наименованием «фэбрасорб». Он обеспечивает хорошее звукопоглощение в широком диапазоне частот, как видно из следующих данных:

Частоты, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
Звукопоглощение, сэбин	43,0	49,7	38,7	50,4	52,1	54,2
Коэффициент звукопоглощения, сэбин/м ²	5,6	7,0	5,8	7,4	7,4	7,6
Коэффициент снижения шума (КСШ) = 0,64						

В таких большепролетных сооружениях, как стадионы, покрытие представляет единственную возможность максимальной акустической обработки замкнутого пространства. Если купол будет выполнен из материала с коэффициентом снижения шума, равным 0,55, то это составит более половины акустической обработки, требующейся для крупного стадиона.

Приведенные выше данные по звукопоглощению фэбрасорба свидетельствуют о том, что последний является подходящим материалом, так как он обеспечивает возможность существенного снижения шума в широком диапазоне частот. Благодаря этому свойству материала фирма CHEMEFAB получила на него патенты во всем мире. Фэбрасорб, как и ширфилл, представляет собой сочетание тефлона и стеклоткани. Поэтому он обладает многими уникальными качествами, свойственными ширфиллу: прочностью, устойчивостью к действию влаги и плесени, высокой огнестойкостью. Кроме того, он имеет пористую структуру, обеспечивающую затухание звука внутри ткани. Фэбрасорб обладает существенными преимуществами как материал для подшивки мягких оболочек, поскольку он создает теплоизолирующее воздушное пространство, а также способствует работе системы приточной вентиляции, проводя теплый воздух вдоль внутренней поверхности внешней ткани там, где происходит таяние снега.

В результате того, что обшивка из фэбрасорба имеет более открытую структуру, она обладает сравнительно высокой проницаемостью для инсоляции. Таким образом, в дополнение к своим механической и акустической функциям, она вместе с основным материалом ширфиллом представляет собой двухслойное тканевое покрытие, которое обеспечивает не меньшее сохранение тепла, чем обычные окна с двойным остеклением.

Свето- и теплотехнические характеристики. Одним из исключительных свойств материалов типа ширфилл является их способность отражать более 70 % падающей на них солнечной энергии при высоком светопропускании и низком поглощении солнечной энергии.

Степень прохождения света через ширфилл определяется в значительной степени числом отверстий в тканой материи. Тефлоновое покрытие само по себе светопроницаемо, и фактически весь свет проходит через крохотные окошечки в ткани. Обычно эти отверстия имеют размер в поперечнике 0,25—0,6 мм, и каждый квадратный метр ткани содержит 500—600 тыс. таких крохотных окошек. Таким образом, 37 160 м² крыши стадиона имеет около 20 млрд. точечных источников освещения интерьера, когда сооружение освещено солнцем. Нетрудно понять, почему проникающий через оболочку рассеянный свет производит такое приятное впечатление.

Общая светопропускаемость составляет 7—12 %, при этом верхний предел определяется требованиями минимальной прочности на разрыв, а нижний предел — минимальной прочности на раздир, а также требованиями к адгезии покрытия. Колебания в пределах этих значений возможны только в ограниченной степени, насколько

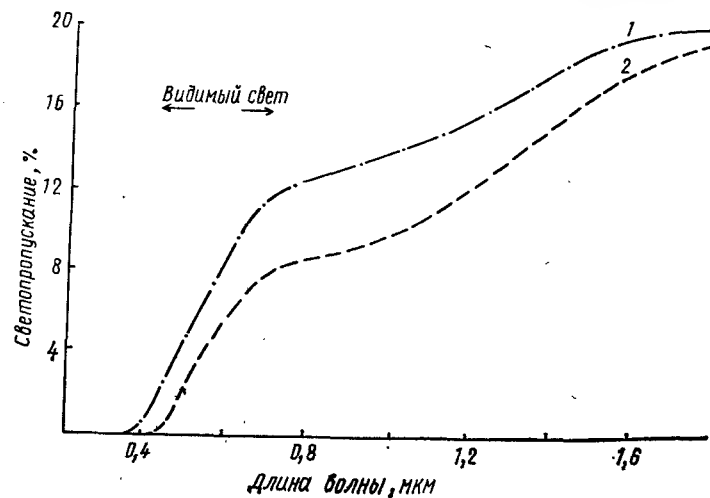


Рис. 2. Спектральная характеристика ширфилла
1 — высокое светопропускание; 2 — низкое светопропускание

позволяют имеющиеся композиции покрытий, содержащие различные количества неорганических непрозрачных веществ. Светопропускание тканей, содержащих эти вещества, показано на рис. 2.

Интегральное светопропускание ширфилла I равно 7,5 %, в то время как пропускание видимой части спектра дневного света составляет около 5 %.

Было установлено, что ткани со светопропусканием около 12 % дают достаточно света, чтобы обеспечить здоровый рост многих растений. Фирма СНЕМФАВ изготовила специальную ткань с исключительно высоким светопропусканием, приближающимся к 20 %. Она была использована в здании Флоридского фестиваля (рис. 3), где в интерьере предусматривалась посадка местных растений, привыкших к высокой инсоляции Флориды. Замеренный уровень освещения в мрачный зимний день в этом сооружении составил 2500 лм/м², в то время как в ясный зимний день создается освещенность на уровне пола внутри здания около 7500 лм/м².

Полагают, что для таких предприятий розничной торговли, как универмаги, которые довольствовались прежде хорошо освещенными и вентилируемыми капитальными зданиями, будут особенно пригодны конструкции из ширфилла. Энергия на освещение составляет до 50 % всей требуемой энергии. Заметная экономия энергии, достигаемая путем снижения нужды в искусственном освещении, очевидна. Спектр света под крышей из ширфилла приближается к спектру дневного света, что дает в результате естественные цвета торговым витринам.

Дополнительная экономия энергии может быть также получена за счет снижения требований к охлаждению. Оценка этой возмож-



Рис. 3. Здание Флоридского фестиваля, внешний вид и интерьер

ности наилучшим образом может быть получена при изучении отражательной и передающей способности вместе с удельным термическим сопротивлением таких систем.

Свойства, обуславливающие экономию энергии. Показатели светопропускания, поглощения и отражения тканей ширфилл I, ширфилл II и фэбрасорб приведены в табл. 5.

Таблица 5. Солнцеоптические характеристики ширфилла

Конструкции		Пропускание, %		Отражение, %	
		при светопрозрачности ширфилла			
		высокой	низкой	высокой	низкой
Однослойные:					
ширфилл I		9±2	7±2	73±3	75±3
ширфилл II		13±2	9±2	73±3	75±3
фэбрасорб		22±3	—	69±3	—
Двухслойные	(ширфилл + фэбра-	5,5	4	75	76
сорб)					

В связи со способностью отражать 70 % солнечной энергии из ширфилла в сочетании с подшивкой из фэбрасорба можно выполнить двухслойную оболочку, обладающую хорошей светопрозрачностью (4—6 %) и в то же время обеспечивающую в летнее время коэффициент затенения до 0,08 (табл. 6).

Таблица 6. Коэффициенты затенения и прирост солнечной энергии для ширфилла и фэбрасорба

Материал	Летний коэффициент затенения	Тепловой баланс, Вт/м²	
		потери тепла (зимой)	поступление солнечной энергии (летом)
Однослойные оболочки			
Ширфилл I-H	0,15	—278	117
Ширфилл I-L	0,12	—278	104
Ширфилл II-H	0,18	—281	139
Ширфилл II-L	0,14	—281	117
S-2AX	0,24	—281	170
Фэбрасорб	0,28	—281	189
Многослойные оболочки			
Ширфилл I-L+фэбрасорб	0,07	—107	57
Ширфилл II-L+фэбрасорб	0,08	—107	63
S-2AX+фэбрасорб	0,13	—107	88

Примечание. Летние условия: внешняя температура 32 °С, скорость ветра 12 км/ч, интенсивность солнечной радиации 782 Вт/м². Зимние условия: внешняя температура —18 °С, внутренняя температура 21 °С, скорость ветра 24 км/ч.

Измеренные значения общего коэффициента теплопроводности для однослойных оболочек и их различных комбинаций показаны в табл. 7, а теплооптические свойства тканей — в табл. 8.

Расчетная подача тепла для осветительных полос из ширфилла при сравнимой солнечной передаче существенно ниже, чем для остекления, что наводит на мысль о реальных выгодах, которые можно извлечь в результате уменьшения затрат на охлаждение и снижения эксплуатационных расходов во время холодного сезона. Подсчитано, что экономия энергии за счет уменьшения дневного освещения и затрат на охлаждение может достигать ежегодно 40—55 %. Такие эксплуатационные качества нельзя игнорировать в мире, все более осознающем значение энергии. Указанные свойства тканевых сооружений с учетом стоимости эксплуатационного цикла делают эти сооружения более выгодными объектами капиталовложений, чем обычные сооружения, и притом с существенно более низкой начальной стоимостью при установке в подходящих климатических условиях (рис. 4).

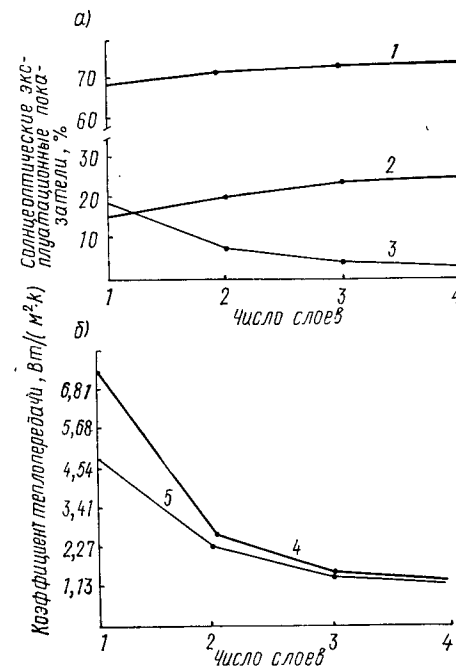


Рис. 4. Солнцеоптические (а) и термические (б) эксплуатационные свойства ткани ширфилл+фэбрасорб

Зимние теплопотери, Вт/м²: —281 —107 —70
Летнее поступление тепла, Вт/м²: 170 88 63
1 — отражение; 2 — поглощение; 3 — пропускание; 4 — зимние условия; 5 — летние условия

Таблица 7. Типичные значения общего коэффициента теплопроводности для оболочек из ширфилла и фэбрасорба

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м²·К)	
	зимой	летом
Однослойные оболочки		
Ширфилл I	7,15	4,77
Ширфилл II	7,21	4,77
Фэбрасорб	7,21	4,83
Многослойные оболочки		
Ширфилл I+фэбрасорб	2,78	2,33
Ширфилл II+фэбрасорб	2,78	2,33
S-2AX+фэбрасорб	2,78	2,33

Таблица 8. Теплофизические свойства стропильных тканей

Материал	T, %	R, %	A, %	U зимой	F зимой	Q зимой	U летом	F летом	Q летом	SC летом
Ширфилл I-H	9,0	73,0	18,0	1,26	0,128	88,2	0,84	0,128	37,4	0,14
Ширфилл I-L	7,0	75,0	18,0	1,26	0,108	88,2	0,84	0,108	33,4	0,12
Ширфилл II-H	13,0	73,0	14,0	1,27	0,160	88,9	0,84	0,159	43,6	0,18
Ширфилл II-L	9,0	75,0	16,0	1,27	0,124	88,9	0,84	0,124	36,6	0,14
S-2AX	18,1	68,0	13,9	1,27	0,210	88,9	0,84	0,210	53,8	0,24
Фэбрасорб-1	22,0	69,0	9,0	1,27	0,240	88,9	0,85	0,240	59,9	0,27
Ширфилл I-H + фэбрасорб-1	4,0	74,1	21,9	0,49	0,068	34,3	0,41	0,71	19,9	0,08
Ширфилл I-L + фэбрасорб-1	3,2	75,7	21,1	0,49	0,057	34,3	0,41	0,61	17,9	0,07
Ширфилл II-H + фэбрасорб-1	5,8	75,3	18,9	0,49	0,088	34,3	0,41	0,09	23,7	0,10
Ширфилл II-L + фэбрасорб-1	4,1	76,2	19,7	0,49	0,068	34,3	0,41	0,07	19,7	0,08
S-2AX + фэбрасорб-1	7,5	72,3	20,2	0,49	0,11	34,3	0,41	0,11	27,7	0,13

Примечание. T — пропускание, R — отражение, A — поглощение, U — общий коэффициент теплопроводности, F — световой поток, Q — количество тепла (зимой отрицательное), SG — коэффициент затенения.

Экономия энергии в тканевом сооружении может быть также достигнута за счет тщательного обращения с механической, вентиляционной и охлаждающей системами. В связи с обычно большим объемом подаваемого воздуха и высокими сводами здания тканевые сооружения хорошо подходят для «последней стратегии», при которой допускается охлаждение только того слоя воздуха, который находится на уровне пола. Воздух более высоких температур под сводами здания будет тогда служить для того, чтобы уменьшать разницу между внутренней и внешней температурами и еще более снижать расход тепла. И наоборот, вентиляторы, расположенные под крышей, могут быть использованы для того, чтобы заставлять нагретый солнцем воздух идти вниз к полу, когда это желательно.

Если понимание тканевого сооружения как многослойного «окна» довести до своего логического завершения, то применение принципа управления энергией по отношению к окнам (а это относится ко всем теплопотерям, связанным с самой разнообразной техникой, включая передвижные системы и системы лучистой теплоизоляции) может привести к созданию сооружения, требующего мало дополнительной энергии для обеспечения комфорта в помещении.

Опыт эксплуатации. Эксплуатация сооружений с оболочкой из стекловолна с тефлоном дала отличные результаты. Сооружения в Ла Верне¹ в настоящее время служат уже почти восемь лет. В связи с высоким модулем упругости и хорошей стабильностью размеров данного материала при проектировании не было предусмотрено периодическое натяжение ткани, как это требуется для оболочек из большинства применяемых синтетических материалов. Излишнего или продолжительного снижения предварительного напряжения не наблюдалось, и вся оболочка остается равномерно туго натянутой и гладкой. Хотя швы находятся под высоким начальным предварительным напряжением, достигающим 17,8 кН/м, тщательное изучение оболочки не показало скольжения или ползучести швов даже при воздействии высоких температур.

Одной из наиболее существенных особенностей материала является сохранение чистой белой внешней поверхности при несложном уходе или даже без него. Тканевые сооружения очень заметны, и загрязнение или обесцвечивание материала портит их внешний вид. После восьми лет воздействия всех погодных факторов оболочки сооружений в Ла Верне так же белоснежны и привлекательны, как в момент возведения. Пыль и грязь, собирающиеся на поверхности в жаркий сухой летний период, легко смываются дождем.

Опыт, приобретенный в результате работы над воздухоопорными сооружениями, оказался в равной степени вдохновляющим. Эти сооружения, большей частью крупные, весьма подвержены различным повреждениям. Хотя во время бурь и наблюдались некоторые повреждения из-за потери давления воздуха, в целом материалы

¹ Два сооружения в Ла Верне являются тентовыми, механически напрягаемыми (Прим. ред.).

оказали стойкое сопротивление в тяжелых условиях работы. В образце материала, взятом из оболочки пневматического сооружения в Миллигене, которую после 5 с лишним лет службы нужно было заменить из-за штормовых повреждений, возникших вследствие плохой работы воздухоподающего оборудования, не было обнаружено значительных потерь физических свойств. Все данные испытаний превосходили первоначальные требования технических условий, и образец шва, вырезанный из поврежденной панели, показал полную прочность материала при испытании полосы на растяжение.

Повреждение бурей выявило одно очень важное преимущество большепролетных тканевых покрытий. Когда неожиданно происходил случайный разрыв, можно было отремонтировать или заменить поврежденную тканевую панель, и сооружение через несколько дней опять вводилось в действие. Две панели крыши стадиона в Понтиаке получили повреждения, когда жесткие боковые панели здания были сорваны во время неистового ветра и бури с дождем, что повлекло за собой потерю давления воздуха и опускание оболочки. Через три дня после бури сооружение опять эксплуатировалось, будучи восстановленным в предусмотренные графиком сроки. С другой стороны, ряд крупных обычных покрытий обрушился или был серьезно поврежден во время жестоких бурь, прошедших неожиданно несколько лет тому назад по всему северо-востоку США. Большинство этих обычных сооружений не могли эксплуатироваться месяцами, многие были совершенно разрушены и требовали полного восстановления. Таким образом, опыт эксплуатации ясно продемонстрировал, что мы имеем материал, который не только соответствует всем требованиям, предъявляемым к строительству постоянных сооружений, но и требует сравнительно мало ухода и может быть легко и быстро отремонтирован в случае неожиданного повреждения.

Фирма «Бэрдэйр» принимала участие в проектировании и изготовлении почти всех оболочек из покрытой тефлоном стеклоткани, возведенных за последние 8 лет. Никаких значительных проблем, связанных с материалом или изготовлением сооружений, не возникло, и все сооружения функционируют удовлетворительно. Материалы, техника изготовления и оборудование непрерывно совершенствуются с целью дальнейшего улучшения эксплуатационных качеств по программам будущего.

Во время работы с архитекторами и инженерами фирма «Бэрдэйр» продолжает подчеркивать важность сотрудничества с ними при обсуждении начальной идеи и разработке предварительного решения. Приобретенный фирмой опыт проектирования, изготовления и возведения крупных тканевых сооружений привел в результате к снижению стоимости сооружений и в значительной степени содействовал безусловному успеху всех наших проектов.

Особые соображения при проектировании. Физические свойства и конструктивные характеристики тканей с покрытием в огромной степени отличаются от свойств обычных строительных материалов. Чтобы получить максимум преимуществ от использования этих но-

вых материалов, важно понять их уникальные свойства и полностью их учесть при проектировании, изготовлении и возведении сооружений.

Высокий модуль упругости, стабильность размеров. Воздухоопорные сооружения нагружаются главным образом так, что испытывают растяжение, в результате чего создаются в высшей степени благоприятные условия работы основного стекловолоконного материала. Хотя стекловолокно имеет высокий модуль упругости и незначительную текучесть, усилия, вызываемые главным образом разностью давления, развиваются по поверхности мембраны; поэтому в правильно запроектированном сооружении тенденция к развитию концентраций напряжений незначительна.

Благодаря высокому модулю и стабильности размеров этого материала он особенно пригоден для двухосно напряженных растянутых тканевых сооружений, где требуются точные допуски на размер, чтобы точно контролировать предварительное напряжение и сохранить устойчивость. При раскрое и изготовлении оболочки должны быть соблюдены точные допуски. Правильно запроектированная тканевая оболочка, изготовленная из стеклоткани с тефлоновым покрытием, будет сохранять свою форму и стабильность без необходимости в повторном напряжении до тех пор, пока стабильна поддерживающая конструкция. Однако, как это будет рассмотрено ниже, особое внимание следует уделять методам раскроя и предварительного напряжения ткани, чтобы не препятствовать релаксации напряжений и избежать излишних перекосов или концентраций напряжений при предварительном напряжении.

Растяжимость материала. Физические свойства тканевых материалов с покрытием изменяются в зависимости от переплетения и конструкции ткани. Поскольку материал ширфилл представляет собой сочетание волокон стекла, имеющих высокий модуль, и тефлона с низким модулем и высокой степенью пластичности, способность материала к удлинению будет также меняться в зависимости от условий загрузки. Чтобы обеспечить правильное распределение напряжений и стабильность структуры при длительной нагрузке, важно точно знать свойства удлинения материала при заданных условиях загрузки, времени и температуры, характерных для действительных условий эксплуатации. В этом заложен ключ к правильному проектированию.

Тканевые материалы анизотропны по своему характеру, что объясняется методом их прядения и покрытия. Физические свойства в направлениях основы и утка существенно различны, в особенности удлинения под нагрузкой. Для точного контроля размеров, необходимого для обеспечения правильной формы сооружения и требуемых напряжений, панели должны быть тщательно раскроены, а форма компенсирована так, чтобы учесть любое изменение в удлинении при действительных условиях загрузки. Для получения точных данных фирма «Бэрдэйр» разработала оборудование и специальную методику испытаний при двухосном напряжении, которые включают действие циклической нагрузки в направлениях основы

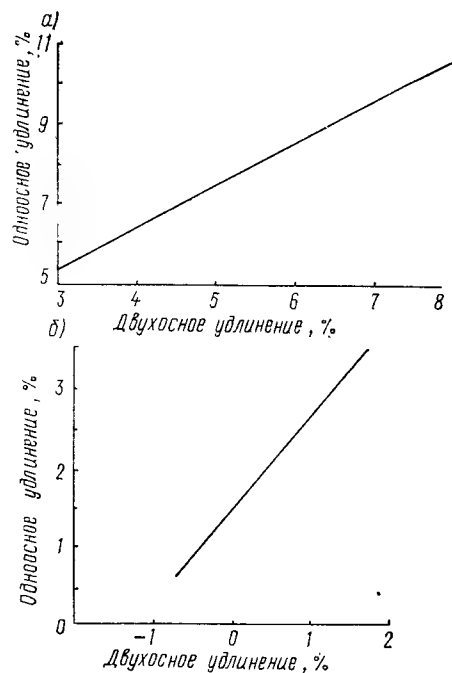


Рис. 5. Типичные одноосное и двухосное удлинения ширфилла I при натяжении 11,77 кН/м

а — по утку; б — по основе

буемое распределение напряжений.

Из-за волнистости текстиля действительный коэффициент Пуассона материала высок. Когда нагрузка в одном направлении двухосно напряженного материала увеличивается, то удлинения материала в противоположном направлении в связи с волнистостью уменьшаются. Свойства материала при двухосном напряжении при ожидаемых условиях нагрузки должны быть точно определены, чтобы обеспечить желаемое развитие предварительных напряжений во время монтажа сооружения. Чередование волнистости зависит от характера переплетения и конструкции ткани и является решающим для эксплуатационных качеств, в особенности для сооружений из напряженной ткани.

Предварительное напряжение ткани при монтаже. Материалы всех тканевых сооружений должны быть предварительно напряжены для того, чтобы стабилизировать оболочку, предохраняя ее от излишних перекосов или перемещений, и поддерживать желаемое распределение усилий. Воздухоопорные сооружения наиболее легко поддаются напряжению, так как форма оболочки обыкновенно допускает монтаж в свободном, по существу ненапряженном состоянии. Напряжение ткани появляется по мере того, как сооружение наполняется воздухом и давление в нем возрастает; таким образом,

пневматические сооружения являются в действительности «после-напряженными».

Напряжения в обычной тентовой оболочке должны быть созданы после ее монтажа, таким образом она становится предварительно напряженной. Там, где возможно, должно быть предусмотрено крепление к анкеровке в свободном состоянии, при этом напряжение прилагается посредством винтовых муфт или других натяжных устройств. Сооружение в Ла Верне предварительно напрягали путем выжимания вверх колонны, чтобы натянуть радиальные канаты и развить в ткани желаемое натяжение. Там, где ткань прикреплена к жестким рамам, это, как правило, невозможно, и необходимо разработать метод крепления, который допускает предварительное напряжение, когда ткань уже прикреплена.

Процесс предварительного напряжения тентового сооружения является решающим фактором проектирования, поскольку стоимость установки в зависимости от конструктивного решения может колебаться в широких пределах. Величина предварительного напряжения должна быть выбрана на основе свойств удлинения материала, определенных при двухосном испытании. Необходимо сделать допуск на ожидаемое снижение напряжения в действительных условиях работы. В связи с этим обычно вначале ткани дается предварительное напряжение, превышающее желаемый уровень, чтобы учесть релаксацию, которая возникает под действием временной и длительной нагрузок.

Сгибы и складки. Оболочка воздухоопорных или тентовых тканевых сооружений подвергается в первую очередь нагрузкам, вызывающим растяжение. Изгиб и складкообразование обычно возникают только во время транспортировки и монтажа. Несмотря на достижения по разработке материала, способного выдерживать грубое обращение, во время монтажа сооружений следует позаботиться о том, чтобы избежать образования острых складок и смятия материала, и разработать такую технику возведения оболочки, в результате применения которой материал не должен подвергаться грубому обращению.

Необходимость в специальном обращении со стеклотканью раньше ограничивала ее применение, поскольку изготовители и монтажники редко обладали необходимым опытом. Чтобы решить эту проблему, для крупных сооружений разработали такую технику изготовления, которая позволяла раскатывать ткань на полу, раскраивать, разрезать и соединять, используя минимальное число операций. Если допускает проект, устанавливают такие размеры полотнищ, которые позволяют намотать материал на стальные трубы для перевозки на участок, для облегчения подъема и обращения с материалом при монтаже оболочки. Для крупных панелей двойной кривизны разработана специальная технология сборки и складирования, которая предохраняет материал от повреждений путем устройства мягких прокладок и применения определенной последовательности складывания.

Например, каждая из 210 модульных секций сооружения

Хадж¹, содержащая почти 2600 м² материала, изготовлена одним куском. Каждый элемент был особо сложен и упакован для перевозки в Саудовскую Аравию.

Методы изготовления и упаковки должны быть согласованы с техникой возведения, чтобы монтаж мог быть выполнен эффективно и материал не подвергался грубому обращению. Оболочку обычно собирают на заводе в укрупненные панели, чтобы свести время возведения к минимуму, так как панели во время их монтажа более всего подвержены повреждениям от ветра. Необходимо разработать такую методику, чтобы стабилизировать панели во время возведения сооружения и свести к минимуму периоды возможного их повреждения.

Рекомендуемый коэффициент запаса. В связи с особенностями тканей для них рекомендуется принять более высокий коэффициент запаса, чем для традиционных материалов. Коэффициенты запаса обычно принимают исходя из данных испытаний на растяжение. Принятие более высокого коэффициента запаса способствует учету более низкой прочности ткани, когда она подвергается непрерывным нагрузкам, а также учету неопределенности величины и распределения аэродинамической нагрузки на сооружения самой разнообразной формы. Поскольку основную нагрузку воспринимает тканевая оболочка, подвергающаяся воздействию погоды, но не каркас, дополнительный запас прочности предохраняет от возрастающего износа материала.

Минимальный запас прочности, обоснованный 30-летним опытом работы с военными и гражданскими сооружениями и равный 4, был принят в качестве стандарта при проектировании всех оболочек. Ожидается, что стеклоткань, покрытая тефлоном, получит меньше повреждений, и поэтому такие оболочки окажутся гораздо более долговечными. Для проектирования при расчете на предельную нагрузку рекомендуется запас прочности, равный 4. Учитывая отрицательные явления, возникающие при длительном и непрерывном воздействии высоких нагрузок на ткань и швы, рекомендуется запас прочности, равный 8—10 по отношению к усилию от предварительного напряжения.

Перспективы. Полагают, что уникальные свойства нового материала в значительной мере будут способствовать признанию тканевых конструкций в архитектурных сооружениях в будущем. В добавление ко многим новым стадионам, находящимся в настоящее время в процессе возведения, воздухоопорные и тентовые тканевые оболочки запроектированы или же в настоящее время проектируются для ряда других сооружений, включая торгово-прогулочные центры, зоопарки и даже правительственные административные комплексы. Новый вокзал Хадж площадью 418 050 м² в международном аэропорту Джидда в Саудовской Аравии сейчас находится в стадии строительства. Он будет служить центром приема палом-

ников, посещающих Мекку. Это сооружение имеет пугающие воображение пропорции, но оно представляет собой идеальный пример применения нового материала, который способен обеспечить красивую и к тому же долговечную крышу в условиях тяжелого климата страны. В настоящее время разрабатываются новые материалы со специальными свойствами, которые, как мы ожидаем, будут обладать улучшенными характеристиками по отношению к свету, требующимися для покрытий, эффективных для пассивных систем использования солнечной энергии. Сейчас изучаются возможности укрытия целого поселка на севере Канады.

Хотя невозможно предвидеть новые области применения покрытых тефлоном стеклотканей, которые могут быть разработаны в будущем, полагают, что возможности их почти безграничны. Фирма «Бэрдэйр» была инициатором в области современных тканевых сооружений и находится во главе новых разработок свыше 20 лет. Мы надеемся, что будем в состоянии использовать наш обширный опыт для помощи архитекторам и инженерам при разработке тканевых сооружений, отвечающих многим новым требованиям.

УЛУЧШЕННЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК¹

Д. Л. Г. Старджен, М. В. Уардл (США)

Появление высокопрочных органических волокон, таких, как кевлар-арамид, которые сочетают механические свойства, близкие к свойствам металлов, с легким весом и свойствами, характерными для обычных тканей, значительно расширили свободу проектирования пространственных покрытий. Выдающаяся прочность (2,76 ГПа), высокий модуль упругости (131 ГПа) и малая плотность (1,45 г/см³) этих волокон делают новые строительные ткани легче и прочнее, чем их аналоги из обычного стекловолокна.

При той же прочности, что у стали, но при плотности, в 5 раз меньшей, арамидные тросы (канаты) существенно снижают собственный вес конструкции оболочки, что и требуется для воздухоопорных и висячих покрытий. Успешное применение данной технологии дает возможность снижения веса гибких конструкций вдвое без ущерба для их прочностных свойств.

В статье рассмотрены свойства и надежность изделий из кевлара в сравнении с обычными материалами.

Применение тканей в современной архитектуре является прямым следствием многовекового опыта применения тентов. Вследствие того, что улучшились механические свойства текстильных тканей и возросла стойкость полимерных покрытий к атмосферным влияниям, стали успешно создаваться более крупные и долго-

¹ Тентовое покрытие международного аэропорта Джидда, Саудовская Аравия (Прим. ред.).

¹ Доклад на Всемирном конгрессе ИАСС в Монреале (Прим. ред.).
© D. L. G. Sturgeon, M. W. Wardle, 1983.

временные пространственные покрытия [1]. Однако разработка гибких, непроницаемых, легких и прочных оболочек не была монополией только строительной науки.

Значительные успехи в развитии тканей с покрытием были достигнуты в области производства аэростатов [2], надувных лодок и складных резервуаров. Во всех этих примерах гибкая конструкция — оболочка, предназначенная для специфической функциональной цели, — содержит в себе текучую среду (гелий, воздух, мелассу и т. д.). Этим достигается предварительное натяжение оболочки.

Материал, используемый для оболочки, должен обладать высокими прочностью и модулем упругости в сочетании с легким весом и гибкостью. Высокая прочность позволяет нести нагрузку с минимальным собственным весом, тогда как высокий модуль упругости предотвращает чрезмерные деформации под нагрузкой. Гибкость очень важна для удобства хранения и обращения с оболочкой. Этим требованиям в возрастающей степени отвечали натуральные материалы, такие как шелк и хлопок, на смену которым пришли синтетические, такие как нейлон и полиэфир, а еще позже стекловолокно.

Самым последним достижением в развитии этих материалов являются высокопрочные и высокомодульные кевлар-aramидные волокна, которые обладают более высокими, чем стекловолокно, прочностью и модулем упругости; кроме того, они легкие и не требуют сложной обработки, как и обычные текстильные ткани. Волокна из кевлар-aramида можно пряхть, при этом ткань обладает свойствами растяжения своего двойника — стекловолокна — при плотности, вдвое меньшей.

Независимо от способа использования гибкой конструкции — в качестве воздухопорной или тентовой — нагрузки на оболочку должны передаваться на землю тросами, которые изготовляют чаще всего из стали, предпочитаемой вследствие ее малого удлинения. Канаты и тросы, изготовленные из волокна кевлар, отличаются прочностью и так же мало вытягиваются, как стальные, имея при этом массу, в 5 раз меньшую. Вес, сэкономленный на тросах, в сочетании с весом самого тканевого покрытия существенно снижает собственный вес этих сооружений.

Цель этой статьи — дать обзор рабочих характеристик арамидных волокон и тканей с покрытием как конструктивных растянутых элементов строительных покрытий. В ней изложен опыт, позволяющий предвидеть поведение этих тканей как строительных материалов, а также рассмотрены свойства тканей из волокна кевлар, использованных для покрытия Олимпийского стадиона в Монреале.

Свойства волокон и канатов. Кевлар принадлежит к совершенно новой обособленной категории органических волокон, отличающейся от привычных нейлона и полиэфиров. Для волокон этой категории Федеральная торговая комиссия утвердила обозначение «арамид».

Кевлар существует в двух формах: кевлар 29 и кевлар 49. Обе формы обладают одинаковой плотностью и прочностью (табл. 1) — соответственно 1,44 г/см³ и 2760 МПа, но кевлар 49 имеет вдвое больший модуль упругости — 131 ГПа, в то время как у кевлара 29 он составляет 62 ГПа, и почти вдвое меньшее удлинение при разрыве (2,4 % против 4,0 %).

В табл. 1 дано сравнение кевлара с рядом важных органических и неорганических волокон, которые нашли применение в строительстве. Из всех этих материалов кевлар имеет самые высокие прочность при растяжении и модуль упругости, если рассматривать отношение этих показателей к их плотности. На рис. 1 показана диаграмма σ — ϵ (напряжения—удлинения) при растяжении кевлара и некоторых других материалов. Как видно из рисунка и таблицы, кевлар по своим свойствам гораздо более близок к неорганическим материалам — стеклу и стали, чем к органическим, что показывают диаграммы σ — ϵ .

В дополнение к выдающимся механическим свойствам волокон кевлар имеют ряд других положительных свойств [3]. Их

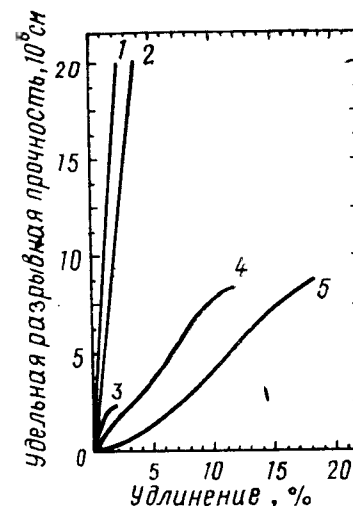


Рис. 1. Удельная разрывная прочность волокон при комнатной температуре (диаграмма «напряжения—удлинения»)

1 — кевлар 49; 2 — кевлар 29; 3 — высокопрочная стальная проволока; 4 — дакрон; 5 — нейлон

Таблица 1. Физико-механические показатели некоторых волокон

Показатель	Кевлар 29	Кевлар 49	Высокопрочная сталь	Стекловолокно E	Нейлон T-728	Дакрон T-73
Разрывная прочность, МПа	2760	2760	1970	2760	986	886
Плотность, г/см ³	1,44	1,44	7,86	2,54	1,14	1,38
Удельная разрывная прочность ¹ , 10 ⁶ см	20	20	2,5	11	9	8
Разрывная длина, км	200	200	25	110	90	80
Модуль упругости, ГПа	62	131	200	72	5	14
Удельный модуль ¹ , 10 ⁸ см	4,3	9	2,5	2,9	0,5	1
Удлинение, %	4,0	2,4	2,0	4,0	18,3	12,0

¹ Показатель, деленный на плотность.

Таблица 2. Действие загрязняющих веществ, содержащихся в воздухе, на ткань из кевлара 49*

Вещество	Концентрация, мг/л	Время действия	Потеря разрывной прочности, %
NO ₂	0,2	6 циклов **	6
O ₃	0,2	6 циклов **	11
SO ₂	19	200 ч	8

* Никаких изменений окраски не обнаружено. Все исследования были проведены при температуре 38 °С и относительной влажности 85—90 %.

** Согласно стандарту Американской ассоциации химического волокна 1 цикл равен 50—100 ч. Используемое здесь время эквивалентно 3—6 годам одновременного действия всех приведенных в таблице веществ в условиях сильнозагрязненной атмосферы.

огне- и теплостойкость выше, чем у большинства органических материалов; волокна кевлар не плавятся — распад начинается при температуре выше 420 °С. Они не теряют прочность во влажном состоянии и имеют очень низкие усадку и коэффициент термического расширения.

Арамидные волокна сохраняют эксплуатационные свойства при температурах от криогенных до 160 °С, что гораздо шире возможностей нейлона и полиэфира. Кевлар устойчив по отношению к большинству обычных органических растворителей, горючих и смазочных материалов. При действии очень сильных кислот и щелочей его прочность снижается, однако он обладает большой стойкостью по отношению к коррозионным факторам, таким, как солевая вода.

Наиболее агрессивными являются вещества, находящиеся в загрязненном воздухе. Данные о действии некоторых загрязняющих веществ в воздухе представлены в табл. 2. Эти исследования были проведены при обычных концентрациях загрязнителей, но при повышенных температурах, чтобы ускорить действие на волокно. Можно заметить, что здесь нет серьезных проблем.

Ползучесть, ползучий разрыв и характеристики усталости кевлара были внимательно изучены в связи с конструктивно требуемым применением веревок, канатов и сложных элементов в авиации и морском деле [4]. Доказательством выдающихся свойств кевлара по сравнению с другими органическими и неорганическими волокнами является высокая прочность и модуль упругости арамидных волокон, о чем свидетельствуют многие литературные источники [5]. На рис. 2 и 3 иллюстрируются только длительная и усталостная прочность по сравнению с другими материалами.

Кевлар теряет прочность под действием ультрафиолетового излучения. Это накладывает некоторые ограничения на область его применения, но обычно оказывается возможным найти экономичное решение.

Прочность при растяжении незащищенной нити из кевлара с весовым номером 1500 денье существенно уменьшается через 200 ч ускоренного ультрафиолетового воздействия — сохраняется лишь 73 % прочности (табл. 3). Пропитка смолой неэффективна, поскольку

Таблица 3. Стойкость кевлара к воздействию ультрафиолетового излучения

Материал и условия испытаний	Разрывное усилие, кН		Потеря прочности, %
	начальное	конечное	
Нить, 1500 денье, кевлар 29 без защиты; 200 ч в везерометре	0,35	0,25	27
Веревка Ø 1,25 см, трехпрядевая, кевлар 29:			
200 ч в везерометре	52	48	7
6 месяцев при солнечном облучении во Флориде	52	46,5	10
Прядь, 1420 денье, кевлар 49, импрегнированный уретаном; 500 ч в везерометре	0,34	0,195	42
Канат, кевлар 49, импрегнированный уретаном; 500 ч в везерометре:			
Ø 3,2 мм, 1×7	10,75	9,00	15
Ø 6,3 мм, 7×7	26,50	23,60	11

Рис. 2. Длительная прочность волокна кевлар 49 (время разрыва t при длительной статической нагрузке)

1 — Кевлар 49, 1420 денье при температуре 25 °С; 2 — нейлон 66 при температуре 25 °С

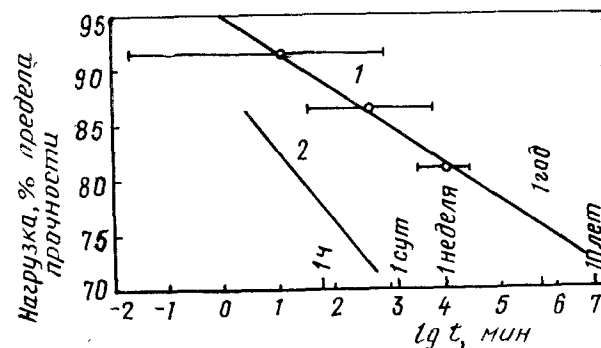
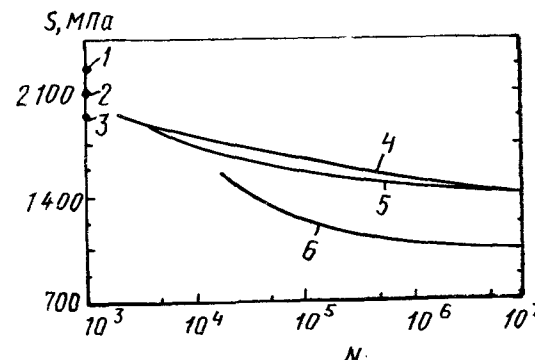


Рис. 3. Разрывная прочность S при статическом (1—3) и циклическом (4—6) нагружении (минимальное напряжение равно 10 % максимального напряжения)

1 — кевлар 29; 2 — кевлар 49; 3 — сталь; 4 — кевлар 29/уретан; 5 — кевлар 49/уретан; 6 — высокопрочная стальная проволока; N — число циклов



ку при этом не происходит поглощения значительной части разрушающего света. Однако в той же нити, сплетенной в веревку диаметром 12,5 мм, потеря прочности намного меньше после идентичного воздействия (сохраняется 93 % прочности). Поверхностные волокна деградировали больше, а внутренние оказались защищенными. Иногда самозащита веревок из кевлара оказывается достаточной, чтобы использовать их без внешнего покрытия. Тем не менее, в большинстве случаев следует защитить кевлар от солнечного света оболочкой или пигментированной резиной.

Обычно для максимальной защиты желательны совершенно непрозрачные покрытия, но в определенных случаях защита может обеспечиваться покрытиями и пигментами, которые поглощают все ультрафиолетовые лучи и часть видимого спектра.

Дополнительно можно отметить, что потеря прочности, наблюдаемая при воздействии ультрафиолетового излучения, значительно снижается, если это воздействие происходит в отсутствие кислорода. Поэтому там, где кевлар применяется как прочностный элемент в наполненных гелием аэростатах и баллонах, ультрафиолетовая деградация может быть снижена созданием газового барьера вокруг ткани из кевлара.

Ниже приведены данные, показывающие эффективность применения покрытий для защиты от ультрафиолетового излучения:

Материал	Потеря прочности, %
Веревка, кевлар 29, 1000 ч в везерометре:	
без покрытия (Ø 6,3 мм)	43
то же, оплетенная дакроном (Ø 8 мм)	6
Канат, кевлар 49, импрегнированный уретаном, 7×7, 500 ч в везерометре:	
без покрытия (Ø 6,3 мм)	16
то же, покрытый черным уретаном толщиной 0,05 мм	<2
Ткань S-281, кевлар 49, 170 г/м ² , 200 ч под «искусственным солнцем»:	
без покрытия	44
то же, покрытая светонепроницаемой пленкой тедлар	0

Свойства тканей с покрытием и без покрытия. В табл. 4 сравниваются ткани из кевлара 29 и стекла Е. Отношение прочности к плотности у кевлара выше в 3—5 раз.

Помимо исключительной прочности кевлар обладает и другими ценными свойствами, которые основываются на особых преимуществах плетеных тканей. Важнее всего то, что само волокно очень плотно и стойко к порезам, в результате чего кевлар оказался наиболее подходящим волокном для изготовления баллистических защитных покрытий.

В строительной практике эта стойкость к порезам придает кевлару сопротивляемость разрушению во время возведения, а также при последующем грубом обращении или каких-либо случайностях. Ткани из кевлара отличаются также высокой прочностью на раздир, свойством, которое очень важно, так как применение тка-

Таблица 4. Типовые конструкции тканей

Материал основы	Тонкость нити, деңье	Конструкция, число нитей/см	Масса, г/м ²	Толщина, мм	Разрывная ¹ прочность, кН/м	Прочность ² плотность
Кевлар S-120	195× ×195	Полотно, 13×13	61	115	44,6/44,6	3,7
Стекловолокно S-120	202× ×202	4-HS, 24×23	109	102	22,4/21,4	1,0
Стекловолокно S-116	202× ×202	Полотно, 24×23	109	102	22,0/21,4	1,0
Кевлар S-181	380× ×380	8-HS, 20×20	170	229	125,0/125,0	3,7
Кевлар S-281	1140× ×1140	Полотно, 6,7×6,7	170	254	116,0/116,0	3,4
Стекловолокно S-181	607× ×607	8-HS, 22×21	301	216	60,7/59,0	1,0
Кевлар, холст	1000× ×1000	Вязанный, 1,2×2,4	41	254	44,6 ³	5,5

¹ Основа/уток.

² Разрывная прочность, деленная на плотность; стекловолокно принято за единицу.

³ По основе.

ни с покрытием часто терпело неудачи вследствие распространения разрывов. Кроме того, эти ткани обладают хорошим сопротивлением удару.

Хотя кевлар является новым волокном и его применение в тканях с покрытием разработано недавно, опыт показывает, что он успешно может быть покрыт наиболее простыми полимерными материалами. Технические приемы, используемые для повышения сцепления с другими органическими волокнами, например нейлоном, обычно применимы и к кевлару. Приведем перечень материалов, которые уже наносились на кевлар: (неопрен, хайпалон¹, нитрильный каучук, нордель¹, буна-N¹, уретановые полимеры, силикон и фторосиликон, поливинилхлорид, тефлон¹ (TFE, FEP), поливиниловый спирт, эпихлорогидрин, тедлар¹, майлар¹).

Ткани, покрытые этими полимерами, применяются для изготовления мягких емкостей, аэростатов, пневматических и тентовых конструкций, спасательных плотов, трапов и т. п.

Прежде чем приступить к более подробному разбору тканей, покрытых поливинилхлоридом, в строительстве, кратко разберем два способа покрытия кевларовой ткани — тефлоном и неопреном. Свойства кевлара, покрытого тефлоном, и стекловолокна сравниваются в табл. 5.

¹ Фирменные наименования (Прим. ред.).

Таблица 5. Свойства тканей, покрытых тефлоном

Материал основы	Разрывная прочность, кН/м	Прочность на раздир, кН	Ткани без покрытия		Ткани с покрытием		Выносливость ² , тыс. циклов
			масса, г/м ²	прочность ¹ плотность	масса, г/м ²	прочность ¹ плотность	
Стекловолокно S-183	86,5	0,1	570	1,0	710	1,0	15
Кевлар S-181	112,5	0,3	170	4,3	544	2,5	>100

¹ Разрывная прочность, деленная на плотность; стекловолокно принято за единицу.
² Загибы вокруг стержня $\varnothing$ 12,5 мм при частоте циклов 250 Гц и нагрузке 26,8 кН/м.

Легкие ткани применяются для конвейерных лент умеренного режима, тогда как тяжелые ткани являются строительными материалами. Стеклоткань, покрытая тефлоном, относится к материалам, применяемым сегодня для большепролетных воздухопорных сооружений. Прочность используемых в настоящее время стеклотканей колеблется от 36 до 178 кН/м [6]. Наиболее очевидным преимуществом кевлара при применении его в строительстве является особая прочность. Это позволяет перекрывать большие площади с тем же собственным весом, что и у стекла, или, иначе, уменьшать вес при той же перекрываемой площади. Не менее важна высокая прочность кевлара при раздире и его выдающаяся долговечность. Испытания кевлара в качестве лент конвейеров показали гораздо более длительный срок службы по сравнению со стекловолокном, возможно, из-за повышенного сопротивления раздиру и усталости. Эти свойства должны обеспечить высокую стойкость тканей, применяемых в строительстве. Ультрафиолетовая деградация волокна может препятствовать использованию тканей из кевлара, покрытых тефлоном, в строительстве. Рекомендуется наружное покрытие из тефлона пигментировать (например, TiO_2), так как чистое тефлоновое покрытие не защищает волокно. Наибольшая прочность будет, конечно, получена при высокопигментированных непрозрачных покрытиях.

Перейдем теперь к тканям с неопреновым покрытием. В табл. 6 приведены характеристики тканей с кевларовой и нейлоновой основой, применяемые для резервуаров с химической жидкостью и надувных плотов. Как видно из таблицы, кевлар имеет высокое отношение прочности к плотности; кроме того, это отношение может быть улучшено снижением толщины покрытия на кевларовой ткани. Малое удлинение и хорошие показатели ползучести кевлара показывают, что он стабилен в отношении размеров.

Кевларовая ткань, а именно, очень плотно плетеная баллистическая ткань, отобранная благодаря устойчивости к порезам и проколам сворачиваемых резервуаров, предназначенных для транспортировки в открытых транспортных средствах, оказалась подходящим материалом для пространственных покрытий.

Очень плотная конструкция ткани понизила прочность кевлара при раздире до уровня примерно нейлоновой ткани. Тем не менее при использовании в большинстве открытых конструкций кевлар имеет значительно более высокую прочность на раздир по сравнению с нейлоном и полиэфирами. Данные о воздействии ультрафиолетового облучения включены для того, чтобы показать, что черное неопреновое покрытие эффективно предохраняет материал от деградации.

Материал Олимпийского стадиона в Монреале. В заключение рассмотрим потенциально важную разработку в области строительных тканей — материал для монреальского Олимпийского стадиона¹ (рис. 4). Это необычное сооружение было задумано архитектором Роже Талибером для круглогодичной эксплуатации. Проект включает убирающееся тканевое покрытие, состоящее из 1800 м² ткани с кевларовой основой. Предполагается поддерживать эту крышу тросами из кевлароaramидного волокна. Собранное покрытие хранится в мачте или башне (слева на рисунке). Без

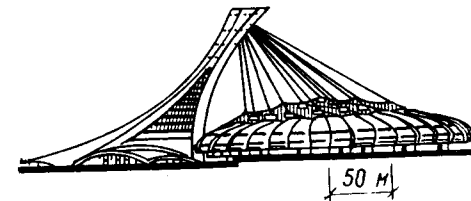


Рис. 4. Олимпийский стадион в Монреале

Таблица 6. Сравнение тканей, покрытых неопреном

Показатель	Нейлон	Кевлар 49
Масса, г/м ² :		
общая	1240	1330
ткань	440	330
покрытие	800	1000
Толщина, мм	1,0	0,9
Разрывная прочность, кН/м	130	227
Прочность ¹ :		
плотность		
без покрытия	1,0	2,4
с покрытием	1,0	1,6
Удлинение при разрыве, %	38	6
Раздир, кН	0,95	0,80
Разрывная прочность после 500 ч ультрафиолетового облучения в везерометре:		
кН/м	130	223
%	100	98

¹ Нейлон принят за единицу.

¹ Тентовое покрытие стадиона в Монреале установлено не было (Прим. ред.).

применения кевлара осуществление этого проекта было бы невозможным. Оно стало реальным благодаря особому отношению прочности к плотности у кевларовой ткани. Ниже приведены характеристики материала, состоящего из кевлара и поливинилхлорида и называемого толвар 60:

Волокно	кевлар 49, 1420 деңье,
Покрытие	пластифицированный
	ПВХ, оранжевый/серый
Общая площадь покрытия	18 000 м ²
Общая масса материала	51 т
Распределение массы, кг/м ² :	
общая	2,2
ткань	1,1
покрытие	1,1
Толщина	2,0 мм
Ширина полотнища	3,2 м

Если бы это сооружение попытались сделать из стеклянных или полиэфирных тканей с такой же прочностью при растяжении, то масса непокрытого материала была бы приблизительно в 4 раза больше, чем при применении кевлара, т. е. более 100 т на всю кровлю. Помимо веса покрытия дополнительным был бы вес поддерживающих тросов, каждый из которых, сделанный из стали, примерно в 5 раз тяжелее, чем предложенные растянутые элементы из кевлара.

Толвар 60 имеет следующие механические свойства:

Разрывная прочность, кН/5 см:	
основа	34,6
уток	34,8
Удлинение при 20 % разрывной прочности, %:	
основа	1,4
уток	1,3
Раздир, кН:	
основа	>2,53
уток	>3,74

Только разрывная прочность отличает этот материал от стеклянных строительных тканей, которые обычно имеют 10—20 % указанной прочности. Преимуществом толвара 60 по сравнению с другими органическими материалами является его малое удлинение.

Чтобы обеспечить как безопасность, так и долговечность этого совершенно нового материала, проведена обширная серия испытаний ткани. Ускоренные испытания в везерометре (табл. 7) позволяют сделать вывод, что покрытие обеспечивает достаточную защиту от ультрафиолетового излучения. Ускоренное термическое старение во влажных и сухих условиях показывает, что старение при окружающей температуре не приведет к ухудшению свойств материала.

Таблица 7. Погодостойкость толвара 60

Условия испытаний	Примерный временной эквивалент, годы	Остаточная разрывная прочность, %
Ускоренное воздействие погодных факторов в везерометре ¹ :		
500 ч	1	98
1500 ч	3	99
2000 ч	4	93
Ускоренное термическое старение:		
30 сут на воздухе при температуре 100 °С	40 (38 °С)	88
7 сут в кипящей воде	10 (38 °С)	76
30 сут в воде из крана	—	99

¹ Везерометр (ксеноновая дуговая лампа мощностью 6000 Вт, боросиликатные фильтры), мокро-сухой цикл 18 мин/102 мин.

Ткань и покрытие демонстрируют хорошее постоянство свойств при различных условиях, включая экстремальный холод:

Воздействия	Повреждения покрытия
Статический сгиб, нагрузка 3,5 Н/см ² на складку, 14 сут	нет (остаточная прочность 96 %)
Сгиб при температуре —46 °С, при радиусе, мм:	
7,5	нет
1,6	трещины с обеих сторон
Динамический сгиб (по Де-Маттиа), ASTM D-430)	появление трещин на сторонах: оранжевой — после 72·10 ³ циклов, серой — после 1,5·10 ⁶ циклов
Загиб на втулке 30 мм при нагрузке 26,8 кН/м	не было разрушения или трещин при 700 тыс. циклов

Покрытие и поддерживающая система спроектированы так, чтобы минимальный диаметр любой складки в ткани был по крайней мере равен 1 м, тем не менее складки диаметром 15 см могут допускаться даже при низкой температуре. Загрязнения воздуха на уровне, типичном для района Монреаля, как показывают ускоренные испытания, фактически не действуют на ткань (табл. 8).

Ткань с покрытием отвечает следующим стандартам ФРГ: DIN 53359 (сгибающийся шнур), DIN 53386 (водопроницаемость, метод 5516), DIN 53388 (цветовая прочность, метод 5672), DIN 53508 (старение в печи, метод 5850) и требованиям несгораемости для класса М2 материалов в соответствии с французским Министерством внутренних стандартов (1973).

Заключение. Высокие прочность и модуль упругости в сочетании с малым весом и гибкостью у покрытых тканей с основой из кевлара дают проектировщику пневматических и тентовых сооружений важную новую степень свободы. Удельная прочность ткани

Таблица 8. Воздействие загрязнителей воздуха на толвар 60

Условия испытаний	Расчетный временной эквивалент	Остаточная разрывная прочность, %	Обесцвечивание
Озон, 6 циклов (приблизительно 300 ч)	6 лет в прибрежной зоне Мексиканского залива	100	Нет
NO ₂ , 6 циклов (приблизительно 150 ч)	3—6 лет в условиях смога Лос-Анджелеса	94	»
Дым от горения пропана (SO ₂ , NO ₂ , пентан), 6 циклов (приблизительно 100 ч)	3—5 лет в Нью-Джерси	100	»

Примечание. Обесцвечивание не наблюдалось ни в одном из трех проведенных испытаний. Краски, чувствительные к указанным воздействиям, обычно заметно обесцвечиваются после двух циклов.

из кевлара соответственно в 2 и 4 раза выше, чем у тканей из полиэфирного волокна и стеклотканей.

Существенная экономия собственного веса сооружений может быть реализована путем использования кевларовых веревок и канатов, имеющих ту же прочность, что и сталь, но в 5 раз более легких.

Устойчивость к атмосферным явлениям, огнестойкость, адгезия, износостойкость, ползучесть и усталость материалов с кевларовой основой способствуют растущему применению этих материалов в строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taillibert R. Architecture Textile/Architecture Mobile. — Techniques et Architecture, 304, p. 32, 1975.
2. Keen L. B. Technology Up-Date on Tethered Aerostat Materials Developments. — J. Coated Fabrics, Vol. 5, p. 16, July, 1975.
3. Riewald P. G., Venkatachalam T. K. Kevlar Aramid Fiber for Ropes and Cables Applications. Marine Kevlar Cable Workshop, Offshore Technology Conference, Houston, May, 1975.
4. Kevlar 49 Data Manual, E. I. du Pont de Nemours and Co., Inc., Kevlar Special Products, Textile Fibers Dept., Wilmington, Delaware 19898.
5. Sturgeon D. L. G. Performance Basis for the Applications of Aramid Fiber Reinforcement, 1975. International Conference on Composite Materials, Geneva/Boston, April, 1975.
6. Geiger D. H. Largest and Lightest Fabric Roof to Date. Civil Engineering—A. S. C. E., p. 82, November, 1975.

IV. Расчет пневматических конструкций

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

К. Ишии (Япония)

Воздухоопорные пневматические сооружения обладают многими преимуществами по сравнению с обычными конструкциями. Они представляют собой весьма эффективные конструктивные системы, в особенности для сооружений с большими пролетами без промежуточных опор.

Пневматические конструкции часто применяются как временные или сезонные сооружения. В то же время наблюдается возрастающий интерес к использованию их в стационарных сооружениях в качестве покрытий спортивных залов или всего стадиона. С появлением нового материала для оболочек — стекловолокнистой ткани с покрытием из тефлона — во всем мире будет расширяться использование конструкций такого рода и одновременно станут совершенствоваться методы их проектирования.

Воздухоопорные конструкции подразделяются на два подвида — с оболочками, усиленными канатами, и без усиления. Мембрана воздухоопорных усиленных оболочек натянута между двумя канатами, которые служат первоначальной конструктивной системой. Прочность канатов на растяжение значительно выше, чем ткани, и, следовательно, они представляют собой элементы, воспринимающие основную нагрузку. Кроме того, канаты в значительной мере ограничивают деформации оболочки.

Для оболочек, усиленных канатами, конструктивный расчет должен включать в себя изучение прочности как оболочки, так и канатов. Обычно такую конструкцию можно рассматривать как тросовую сеть и совершенно не принимать во внимание прочность самой мембраны. Анализ сплошных мембран в принципе подобен анализу тросовых сетей, однако более сложен. В этой статье рассматриваются оболочки, не усиленные канатами.

Воздухоопорные конструкции относятся к категории неустойчивых, и при их анализе возникает необходимость рассмотрения двух различных этапов расчета:

1) определение первоначальной геометрии, когда равновесное состояние оболочки устанавливается под действием внутреннего давления и постоянной нагрузки;

2) анализ статической и динамической реакций оболочки, обладающей первоначальной геометрией, на прикладываемые внешние нагрузки.

© Kazuo Ishii, 1983.

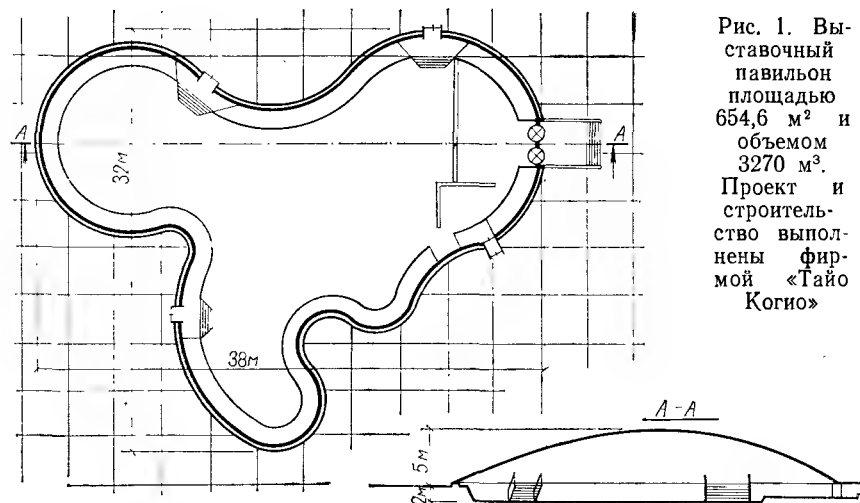


Рис. 1. Выставочный павильон площадью 654,6 м² и объемом 3270 м³. Проект и строительство выполнены фирмой «Тайо Когито»

Оба этапа представляют собой геометрически нелинейные задачи. При определении первоначальной геометрии должны быть удовлетворены условия равновесия. При анализе реакции оболочки на приложение внешних сил большое значение имеет геометрическая жесткость, связанная с напряженным состоянием оболочки, поскольку рассматриваемые конструкции не имеют обычной упругой жесткости в первоначальной стадии деформирования.

В данной статье изложен процесс проектирования пневматических конструкций, особенно конструкций на произвольном контуре. В качестве примера рассмотрена пневматическая конструкция покрытия выставочного павильона в Японии (рис. 1).

При проектировании решались следующие основные задачи.

1. *Определение формы поверхности.* Описан метод получения формы оболочки при равномерном ее натяжении внутренним давлением. Поскольку поверхность оболочки аналитически не задана, численный анализ применим только к задаче определения формы.

2. *Раскрой в соответствии с требуемой формой.* Приведен метод численного определения выкройки оболочки, необходимой для получения покрытия желаемой формы. По этому методу выкройки получают автоматически с помощью графопостроителя.

3. *Статический расчет.* Матрицы, необходимые для расчета пневматических конструкций, составлены на основе принципа виртуальных работ. Расчеты на воздействие снеговой нагрузки, ветра и внутреннего давления выполняют методом конечных элементов применительно к мембранам, испытывающим большие перемещения.

4. *Динамический расчет.* Этот расчет базируется на методе конечных элементов с использованием итерационной процедуры при постепенном нагружении. Метод учитывает особенности мембранных конструкций, т. е. значительные деформации и изменение геометрии, линейные и ортотропные характеристики материала, изменения системы конструкции из-за неспособности ее элементов к со-

противлению сжатию. Для определения основных характеристик колебаний конструкции принята простая динамическая нагрузка.

Определение формы. Пневматические сооружения рассматривают как новый вид конструкций с той точки зрения, что первоначальная их геометрия при наличии внутреннего давления должна определяться до того, как начинается обычный анализ напряжений в результате действия внешних нагрузок.

Возможная конфигурация пневматического сооружения связана с условием, что его геометрия может обеспечить равновесие между внутренним давлением и напряжениями в оболочке.

Понятие «определение формы» означает выбор из ряда возможных именно той формы, которая обеспечит конфигурацию поверхности, удовлетворяющую архитектурным и строительным требованиям, а также установление зависимости формы поверхности от действующих усилий.

Проблема нахождения формы пневматических конструкций изучалась с разных точек зрения. Имеется ряд методов анализа, которые позволяют найти удовлетворительную форму поверхности в соответствии с внутренним давлением при заданном распределении напряжений в оболочке и известных граничных условиях.

Оболочки из растяжимых тканей при действии постоянного натяжения сохраняют длительное время свою форму и геометрическое подобие только при условии, если напряжения, которые испытывает оболочка, равновелики в каждой точке и в каждом направлении. Деформативность таких материалов оболочки, как ткани с покрытием, сравнительно велика. Поэтому для предварительного расчета пневматических сооружений важно представить форму оболочки при одинаковом во всех направлениях натяжении.

Форма пневматических оболочек, равнонапряженных внутренним давлением, определяется исключительно условиями контура и высотой ее подъема. Экспериментально мы получали такие формы с помощью мыльных пленок. Оболочка с равномерным напряжением идентична минимальной поверхности, облегаяющей заданный объем. Хотя получить мыльные пленки обычно очень просто, измерить их геометрию довольно сложно. Разработаны методы визуального наблюдения и освещения мыльных пленок для фотографической их оценки, однако для обеспечения высокой точности измерения требуется большое мастерство экспериментатора.

Рассмотрим два метода получения формы равнонапряженной оболочки при внутреннем давлении.

По первому методу напряженное состояние оболочки описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, разрешаемыми численно. Второй метод заключается в использовании метода конечных элементов для определения формы (предполагается, что поверхность состоит из конечных элементов плоской треугольной формы).

1. Решение с помощью метода конечных разностей. Равнонапряженная поверхность имеет среднюю кривизну H .

$$2H = 1/R_1 + 1/R_2 = p/n_0, \quad (1)$$

где R_1, R_2 — радиусы главных кривизн; p — внутреннее давление; n_0 — напряжение оболочки.

Это условие принимается в качестве характеристики равнонапряженной поверхности. Когда поверхность задана как $Z = Z(x, y)$ в декартовых координатах, дифференциальное уравнение формы равнонапряженной поверхности в частных производных без учета собственного веса оболочки имеет вид

$$\frac{Z_{xx}(1 + Z_y)^2 + Z_{yy}(1 + Z_x)^2 - 2Z_x Z_y Z_{xy}}{(1 + Z_x^2 + Z_y^2)^{3/2}} = \frac{p}{n_0}, \quad (2)$$

где индексы при Z обозначают дифференцирование по x, y .

Для случая полярных координат $Z(r, \Phi)$ частное дифференциальное уравнение приобретает вид

$$\frac{(1 + Z_\Phi^2/r^2) Z_{rr} + (1 + Z_r^2) (Z_r/r + Z_{\Phi\Phi}/r^2) - 2Z_r (Z_\Phi/r) (Z_\Phi/r)_r}{[1 + Z_r^2 + (Z_\Phi/r)^2]^{3/2}} = \frac{p}{n_0}. \quad (3)$$

За исключением нескольких особых случаев, для которых возможны точные решения, уравнения (2) и (3) могут быть решены только численными методами. Известно несколько методов численного решения этих дифференциальных уравнений, и возможность их использования для пневматических сооружений обсуждалась рядом авторов. Однако численные методы применимы только к оболочкам, связанным с жестким контуром. В тех случаях, когда контуром служат канаты, мы получаем два взаимозависимых нелинейных дифференциальных уравнения. Эта задача почти неразрешима.

В таком случае рекомендуется рассчитывать сооружения данного типа с помощью метода конечных элементов.

Уравнение (2) может быть записано в конечных разностях. Тогда вместо решения дифференциального уравнения дается приближенное решение в виде системы алгебраических уравнений, как правило, нелинейных.

Заменим дифференциалы разностями

$$\left. \begin{aligned} Z_{x(i,j)} &= \frac{Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}}{2h}; & Z_{y(i,j)} &= \frac{Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1}}{2h}; \\ Z_{xx(i,j)} &= \frac{Z_{i+1,j} + Z_{i-1,j} - 2Z_{i,j}}{h^2}; \\ Z_{yy(i,j)} &= \frac{Z_{i,j+1} + Z_{i,j-1} - 2Z_{i,j}}{h^2}; \\ Z_{xy(i,j)} &= \frac{Z_{i+1,j+1} - Z_{i-1,j+1} - Z_{i+1,j-1} + Z_{i-1,j-1}}{4h^2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где h — размер квадратной ячейки сетки, образованной координатами $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$ в точке решетки (i, j) .

Можно найти приближенное значение координат поверхности $(Z_{i,j})$.

Для каждой внутренней точки (i, j) получаем следующие разностные уравнения:

$$\begin{aligned} Z_{i,j} [8h^2 + (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}) - (Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1})] / (2h^2) &= Z_{i+1,j} - \\ - Z_{i-1,j} - Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1} + (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j})(Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1}) / (4h^2) - \\ - (Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1})(Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}) \times \\ \times (Z_{i+1,j+1} + Z_{i-1,j-1} - Z_{i+1,j-1} - Z_{i-1,j+1}) / (8h^2) + \\ + (Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1})^2 (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}) / (4h^2) - \\ - 1/\sqrt{4h^2 + (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j})^2 + (Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1})^2} p / (8h^3 n_0). \end{aligned} \quad (5)$$

Граничные условия задаются обычно фиксированными координатами внешних точек контура.

Решение системы уравнений (4) относительно координат внутренних узлов сетки может быть осуществлено методом Гаусса — Зайделя. Этот метод заключается в том, что сначала устанавливают исходные величины координат Z_y в качестве первого приближения. Для оболочек, которые подвергаются действию нагрузок, характерных для пневматических сооружений, метод Гаусса — Зайделя дает обычно плохую сходимость, а если стрела подъема оболочки довольно высока, то сходимость вообще не может быть достигнута. Однако программа Гаусса — Зайделя для ЭВМ очень проста.

Когда контур криволинеен (рис. 2), он обычно не проходит через узловую точку, и граничные условия выражаются неэквидистантными конечными разностями. На рис. 3 и 4 показана форма, полученная конечно-разностным методом.

2. Решение с помощью метода конечных элементов. Разбиение поверхности оболочки на элементы ведет обычно к искривленным элементам. В большинстве случаев, однако, можно получить хорошее приближение геометрии оболочки путем сборки плоских элементов треугольной и четырехугольной формы. Для оболочки произвольного вида могут быть использованы треугольные элементы, как показано на рис. 5. С помощью треугольных элементов легко оперировать с неправильными формами и варьировать размер ячеек вблизи мест концентрации напряжений.

Важно подчеркнуть, что при использовании плоских элементов бывают ошибки, связанные с принятыми функциями перемещений. Однако эти геометрические ошибки уменьшаются по мере уменьшения размера ячеек.

Искривленные элементы позволяют более точно отражать геометрию оболочки. Об искривленных элементах оболочки опубликовано мало данных. При расчете пневматических сооружений чаще всего используют треугольные элементы. Для искривленной поверхности оболочки следует учитывать ошибки геометрической дискретизации, вызванные использованием плоских элементов.

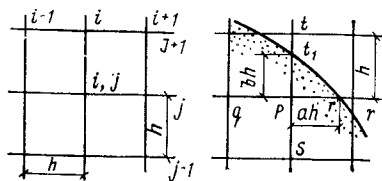


Рис. 2. Конечно-разностные сетки и пересечение сетки с кривой граничной линией

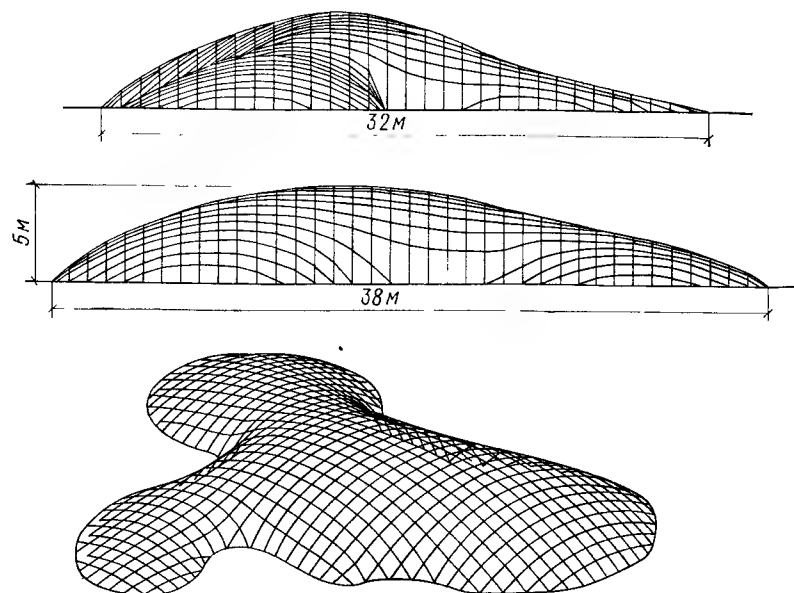


Рис. 3. Равнонапряженная форма оболочки под внутренним давлением, найденная методом конечных разностей ($p/n=0,1414$)

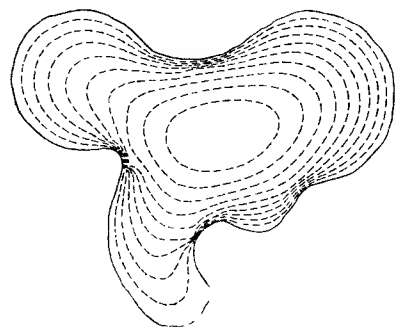


Рис. 4. Горизонтальная оболочка, изображенной на рис. 3

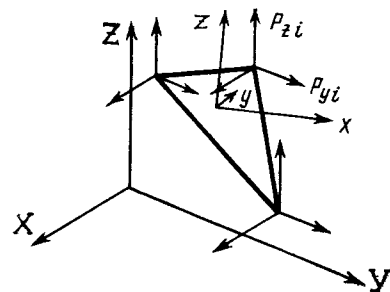


Рис. 5. Локальные и глобальные координаты элемента. Направление x в плоскости элемента находится в плоскости, параллельной xy

Использование совершенно плоских элементов может быть выгодным для сооружений с гладкой поверхностью. Однако для сооружений с изогнутой поверхностью сложной геометрии ошибки дискретизации могут свести на нет преимущества плоского элемента. Пневматические сооружения, как правило, имеют гладкую поверхность.

В этой статье описывается метод определения формы оболочки, испытывающей равномерное напряжение под действием внутреннего давления, с использованием треугольных плоских элементов.

Рис. 5 изображает треугольный элемент оболочки, не обладающий изгибной жесткостью. Уравнения равновесия в узле i составлены исходя из условий постоянства полной потенциальной энергии:

$$\left. \begin{aligned} P_{xi} &= \frac{1}{2S} (CY_{jk} + BZ_{jk}); \\ P_{yi} &= \frac{1}{2S} (AZ_{jk} + CX_{jk}); \\ P_{zi} &= \frac{1}{2S} (BX_{jk} - AY_{jk}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где уравнение плоскости записывается в виде

$$AX + BY + CZ + D = 0, \quad (7)$$

а уравнение плоскости, проходящей через заданные точки i, j, k , может быть записано в виде детерминанта

$$\begin{vmatrix} X - X_i & Y - Y_i & Z - Z_i \\ X_j - X_i & Y_j - Y_i & Z_j - Z_i \\ X_k - X_i & Y_k - Y_i & Z_k - Z_i \end{vmatrix}, \quad (8)$$

откуда

$$\begin{aligned} A &= Y_{ji} Z_{ki} - Y_{ki} Z_{ji}; \\ B &= Z_{ji} X_{ki} - X_{ji} Z_{ki}; \\ C &= X_{ji} Y_{ki} - X_{ki} Y_{ji}, \end{aligned}$$

где $X_{ji} = X_j - X_i$ и т. д.

Когда добавляются усиливающие или обтягивающие канаты, принимающие на себя часть нагрузки, функция потенциальной энергии Π может быть записана в следующем виде по отношению к определяемому элементу g , показанному на рис. 6:

$$\Pi = \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{k=1}^n T_k (L_k - C_k), \quad (9)$$

где S_i — площадь треугольного элемента i ; L_k — длина элемента каната после деформации; C_k — первоначальная длина элемента каната; T_k — множитель Лагранжа.

Следует заметить, что условие постоянной длины каната должно быть введено как вспомогательное.

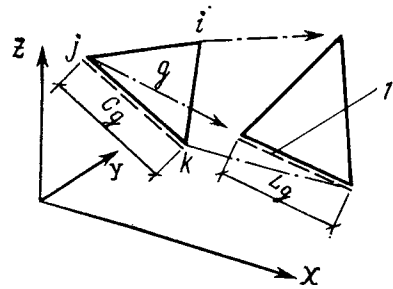


Рис. 6. Координаты и перемещения g -го элемента
1 — элемент каната

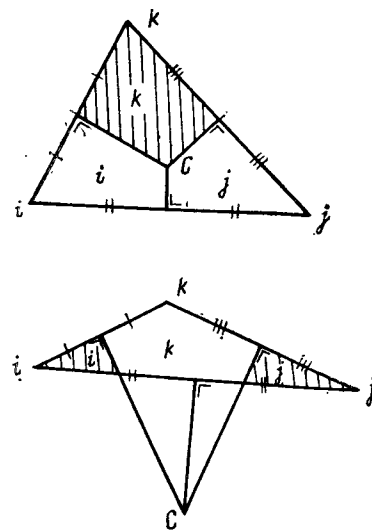


Рис. 7. Центры C описанной окружности

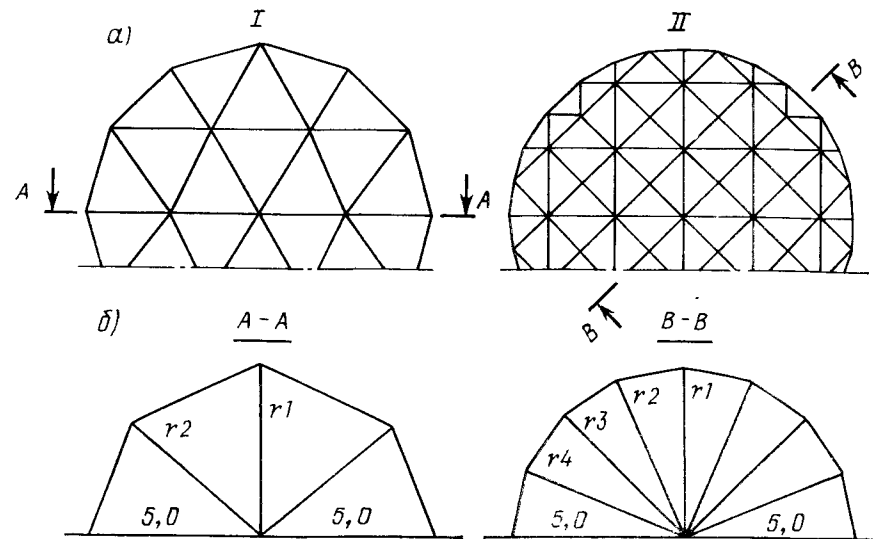


Рис. 8. Разбивка поверхности сеткой

a — первичная разбивка; b — формы сферы после обсчета; I — число элементов 24; II — число элементов 100

В уравнении (9) независимые переменные — это координаты узлов и множитель Лагранжа T_k . Из условия полной потенциальной энергии по отношению к X, Y, Z мы имеем следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{g=1}^m \frac{\partial S_g}{\partial X_i} + \sum_{g=1}^n T_g \frac{\partial L_g}{\partial X_i} &= 0; \\ \sum_{g=1}^m \frac{\partial S_g}{\partial Y_i} + \sum_{g=1}^n T_g \frac{\partial L_g}{\partial Y_i} &= 0; \\ \sum_{g=1}^m \frac{\partial S_g}{\partial Z_i} + \sum_{g=1}^n T_g \frac{\partial L_g}{\partial Z_i} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Очевидно, что уравнения (10) являются уравнениями равновесия узлов, записанными с учетом геометрии после деформации. На основании другого условия постоянства энергии по отношению к T_k мы имеем дополнительное условие равновесия элемента подкрепляющего каната, т. е.

$$L_g - C_g = 0. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) образуют основные совместные уравнения с неизвестными координатами узлов и множителями Лагранжа. Для решения этих нелинейных совместных уравнений может быть применен метод Ньютона—Рафсона.

Нагрузки от внутреннего давления на элемент пропорциональны трем площадям, на которые делится окружность, описанная вокруг треугольного элемента (рис. 7).

Точность. Трудно говорить об ошибках в общих случаях, однако в каждом отдельном случае ошибка может быть установлена путем сравнения с известными точными решениями, где использованы два или более вида элементов. Примером такого рода является решение для сферы.

Используются два вида деления на элементы, и результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что при использовании элементов меньшего размера существенных уточнений не достигается. Это

Таблица 1. Вычисленные положения узлов (радиусы)

Радиусы	Решение		
	точное	для 24 элементов	для 100 элементов
r_1	5,0	5,0	5,0
r_2	5,0	4,9940	4,9120
r_3	5,0	—	5,0520
r_4	5,0	—	4,9770
p/N^*	0,4	0,435	0,411

* p — внутреннее давление; N — натяжение оболочки.

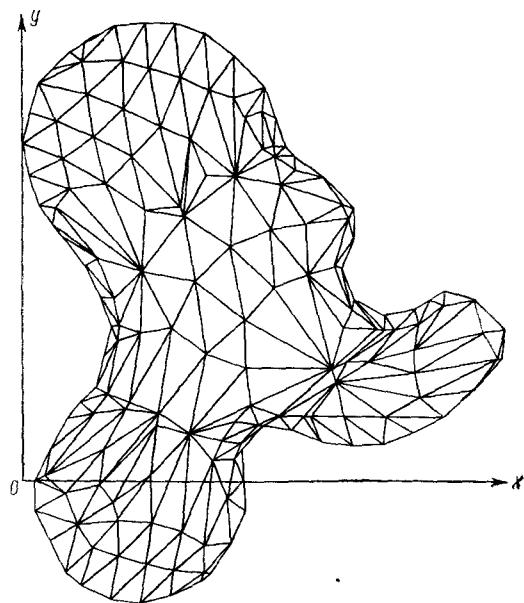
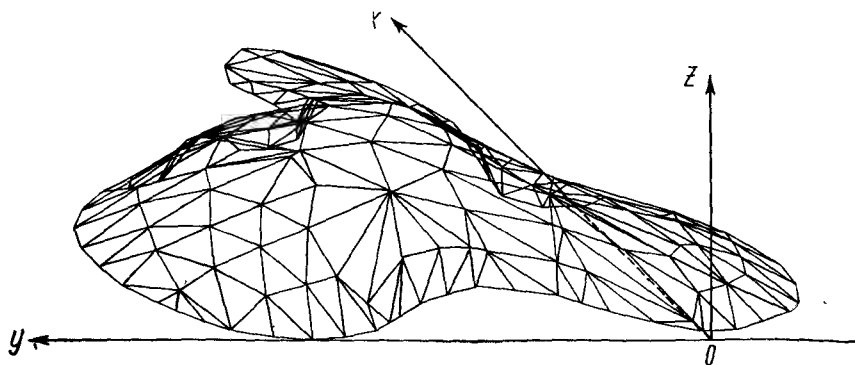
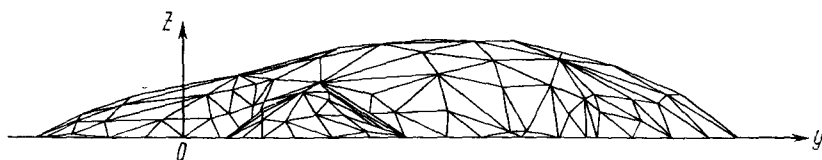
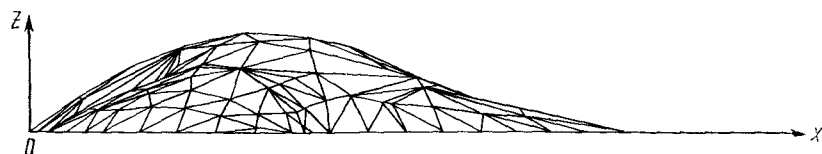


Рис. 9. Равнонапряженная форма под внутренним давлением по точной схеме ($p/n=0,1284$)



указывает на то, что сходимость физической аппроксимации с подлинной формой при плоских треугольных элементах бывает хорошей и достаточно точной для практического применения (рис. 8).

Результаты. Сходимость в данном примере происходила медленно, и после 135 циклов по методу Гаусса — Зайделя максимальное отклонение уравнивающей силы составило лишь 0,122 % нормальной узловой нагрузки.

В процессе вычисления некоторые элементы находят на другие. Во избежание этого устанавливается предел смещений. Такая неустойчивость является следствием идеализации поверхности при представлении ее плоскими треугольниками. Этот недостаток можно устранить, используя более сложную изогнутые элементы или усовершенствовав сетки ячеек там, где элементы разрушаются. Результаты, полученные после 135 циклов по методу Гаусса — Зайделя, показаны на рис. 9.

Приближенное решение. Условия равновесия внутренних и внешних сил могут быть записаны в виде

$$\{R\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV. \quad (12)$$

Конечные элементы, не обладающие упругой жесткостью, но остающиеся в равнонапряженном состоянии, соответствуют мыльной пленке, потенциальная энергия которой оценивается в зависимости от напряжения ее поверхности. Эти элементы обладают только геометрической жесткостью.

Используя их, можно получать надувные формы равного напряжения. Такой приближенный метод дает хорошую сходимость за несколько первых циклов. Результаты и их точность показаны на рис. 10 и в табл. 2.

Цель расчета заключается в том, чтобы получить потенциально эффективную форму для последующего использования в качестве конструкции, а не в том, чтобы выполнить детальный анализ. Поэтому сходимость можно считать удовлетворительной.

Раскрой с целью получения желаемой поверхности. Материал, из которого делают оболочки, не сжимается и не растягивается, как резина. Следовательно, этот материал нужно раскроить и сшить так, чтобы получить желаемую форму криволинейной поверхности. Подобная операция очень проста, если требуется получить сферическую или цилиндрическую поверхность. Однако, если оболочка имеет сложную форму, то раскрой требуемой поверхности представляет собой трудную задачу. Ниже описан способ раскроя, обеспечивающий получение желаемой формы.

Геодезические линии. Когда поверхность нельзя выразить уравнением, предполагается, что геометрические характеристики гладкой криволинейной поверхности могут быть удовлетворительно представлены геометрическими характеристиками многогранной поверхности, построенной из небольших плоских элементов.

Геодезические линии на криволинейной поверхности аппроксимируются геодезическими линиями на многограннике. По мере

Таблица 2. Сравнение результатов приближенного решения с уточненным

Точная схема (135 циклов)					Приближенная схема				
Узел	X	Y	Z	Узел	X	Y	Z	Узел	X
Нагрузка в каждой узловой точке									
1	-0,1757 D+02	-0,1935 D+02	0,6293 D+02	1	-0,1738 D+02	-0,2388 D+02	0,4327 D+02	1	-0,1738 D+02
2	-0,1217 D+02	-0,3412 D+02	0,9278 D+02	2	-0,1573 D+02	-0,3860 D+02	0,6603 D+02	2	-0,1573 D+02
3	0,3467 D+01	-0,3860 D+02	0,9434 D+02	3	-0,5136 D+01	-0,4374 D+02	0,7044 D+02	3	-0,5136 D+01
4	0,1472 D+02	-0,3239 D+02	0,7235 D+02	4	0,7856 D+01	-0,4505 D+02	0,7200 D+02	4	0,7856 D+01
5	0,1313 D+02	-0,1564 D+02	0,3571 D+02	5	0,2072 D+02	-0,3802 D+02	0,6047 D+02	5	0,2072 D+02
6	-0,4252 D+02	-0,2130 D+02	0,1068 D+03	6	0,3757 D+02	-0,4110 D+02	0,7081 D+02	6	0,3757 D+02
7	-0,1277 D+02	-0,1929 D+02	0,8138 D+02	7	0,2157 D+02	-0,3935 D+02	0,7395 D+02	7	0,2157 D+02
8	0,5779 D+01	-0,3657 D+02	0,1347 D+03	8	0,5949 D+01	-0,3725 D+02	0,7609 D+02	8	0,5949 D+01
9	0,3482 D+02	-0,4405 D+02	0,1433 D+03	9	-0,7679 D+01	-0,3433 D+02	0,7504 D+02	9	-0,7679 D+01
10	0,4150 D+02	-0,3140 D+02	0,9448 D+02	10	-0,1970 D+02	-0,3166 D+02	0,7349 D+02	10	-0,1970 D+02
Невязка величин усилий									
1	-0,1106 D-03	0,2924 D-03	0,2267 D-02	1	-0,9895 D+00	0,1364 D+01	0,4644 D+00	1	-0,9895 D+00
2	0,5638 D-03	0,1145 D-03	0,7656 D-03	2	0,8084 D+00	-0,7558 D+00	-0,1945 D+00	2	0,8084 D+00
3	0,4111 D-03	-0,3637 D-03	0,1752 D-02	3	-0,5188 D+00	0,4094 D+00	0,2840 D+00	3	-0,5188 D+00
4	-0,8379 D-04	0,4058 D-03	-0,7786 D-03	4	-0,3549 D+00	0,2646 D+00	0,3521 D+00	4	-0,3549 D+00
5	-0,7746 D-03	0,6718 D-03	-0,1781 D-02	5	-0,1881 D+00	0,3939 D+00	0,4906 D+00	5	-0,1881 D+00
6	-0,2539 D-02	-0,7239 D-04	0,6779 D-02	6	-0,2879 D+00	0,3329 D+00	0,5918 D+00	6	-0,2879 D+00
7	-0,6684 D-03	-0,3744 D-02	0,2435 D-01	7	0,2585 D+00	-0,1596 D+00	0,3161 D-02	7	0,2585 D+00
8	0,1415 D-03	-0,5776 D-03	0,6517 D-02	8	-0,1148 D+00	0,1347 D+00	0,1904 D+00	8	-0,1148 D+00
9	0,6049 D-03	0,1085 D-02	-0,2986 D-02	9	-0,1811 D+00	0,2024 D+00	0,1177 D+00	9	-0,1811 D+00
10	-0,6040 D-03	0,4041 D-03	-0,1160 D-02	10	-0,1991 D-01	-0,3112 D-01	0,3208 D-01	10	-0,1991 D-01

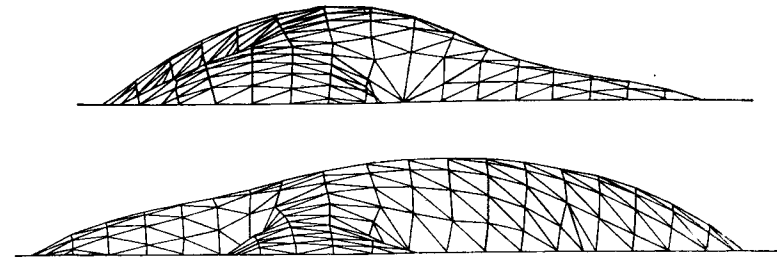


Рис. 10. Равнонапряженная форма под внутренним давлением по приближенной схеме ($p/n=0,1284$)

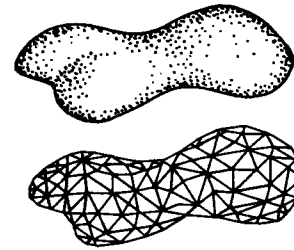


Рис. 11. Произвольно искривленная поверхность, разделенная на треугольные элементы

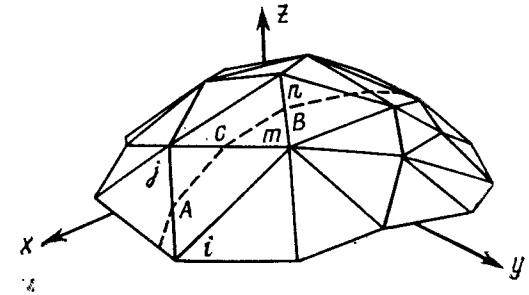


Рис. 12. Выкройка полотнища
1 — геодезическая линия

уменьшения размеров элементов должно произойти полное совмещение. Опыт показывает, что такое совмещение действительно имеет место.

Произвольно искривленная поверхность, разделенная на треугольные элементы, показана на рис. 11. Рассмотрим типичные элементы, обозначенные буквами i, j, m и j, m, n .

Глобальные координаты трех узловых точек определяют плоскость элемента. Пусть A и B обозначают две заданные точки на каждом треугольном элементе и пусть точка C лежит между двумя элементами.

Длина $(AC+CB)$ становится самой короткой, когда угол jCA равняется углу mCB , т.е. когда линия ACB является геодезической линией. Это можно проделать далее со следующим элементом и продолжить процесс до границы оболочки.

Геодезическая линия, проходящая через любую обычную точку на поверхности, однозначно определяется ее направлением через точку или двумя заданными точками на поверхности. Направление геодезической линии должно быть найдено после общего рассмотрения.

Если полосу бесконечно малой ширины с геодезической линией в качестве центральной линии вырезать из поверхности и развернуть в плоскость (рис. 12), то центральная линия $A-B$ может стать прямой, в то время как C_1, C_2 и D_1, D_2 , очевидно, не будут лежать в ее плоскости, поскольку узкая полоса неразвертываема. Это означает, что геодезическая линия на поверхности может быть определена как кривая, соприкасающаяся плоскостью к которой в каждой точке содержит нормаль к поверхности в этой точке. Поверхность, образованная из плоских полос, будет только приближением к континуальной поверхности. Предварительное натяжение в границах допустимого напряжения улучшит форму оболочки.

Многочисленные определения выкроек методом геодезических линий с помощью ЭВМ показали его приемлемость как в отношении точности, так и с точки зрения его трудоемкости.

Изготовление выкройки. После вычисления геодезических линий на поверхности можно установить форму выкроек, вычислив с помощью ЭВМ расстояние между двумя соседними линиями. Выкройки получаются автоматически с помощью графопостроителя (рис. 13 и 14).

Точность метода. В табл. 3 приведены координаты геодезической линии ab на сфере, вычисленные представленным здесь методом (см. рис. 12), в сравнении с данными, полученными точным решением. Как видно из этой таблицы, метод дает хорошие результаты, несмотря на то, что криволинейная поверхность аппроксимирована плоскими треугольными элементами (рис. 15).

Анализ статической и динамической реакций оболочки. Следующим шагом при расчете конструкции является анализ статичес-

Таблица 3. Координаты Y геодезической линии ab , найденные разными методами

Значения X	Значения Y			
	точные решения	метод треугольных элементов		метод конечных разностей $\Delta h=r/10$
		$\Delta h=r/10$	$\Delta h=r/20$	
0,0	5,0	5,0	5,0	5,0
0,5	4,7712	—	4,7697	—
1,0	4,5266	4,5255	4,5271	4,5130
1,5	4,2660	—	4,2647	—
2,0	3,9888	3,9767	3,9891	3,9867
2,5	3,6947	—	3,6937	—
3,0	3,3826	3,3643	3,3828	3,3796
3,5	3,0517	—	3,0537	—
4,0	2,7005	2,6996	2,7013	2,6969
4,5	2,3272	—	2,3282	—
5,0	1,9293	1,9164	1,9293	1,9254
5,5	1,5035	—	1,5076	—
6,0	1,0451	1,0432	1,0487	1,0419
6,5	0,5475	—	0,5497	—
7,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

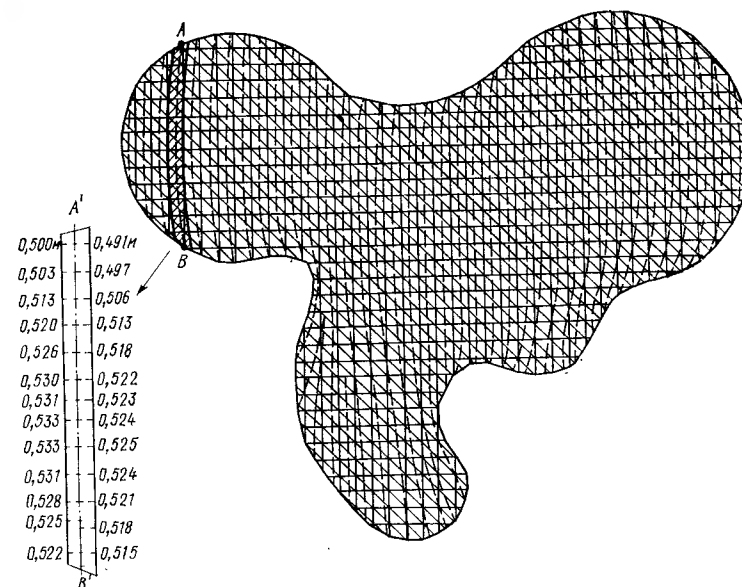


Рис. 13. Раскрой полотнища AB . Длина геодезической линии $A'B'$ равна 12,659 м; треугольные элементы и геодезические (штриховые) спроецированы на плоскость

Рис. 14. Раскрой полотнищ оболочки

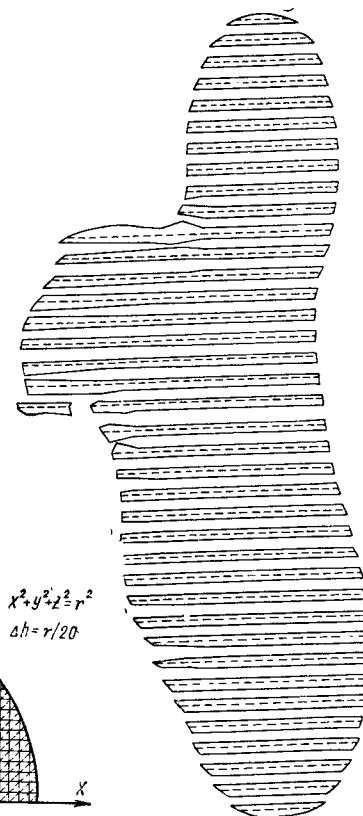
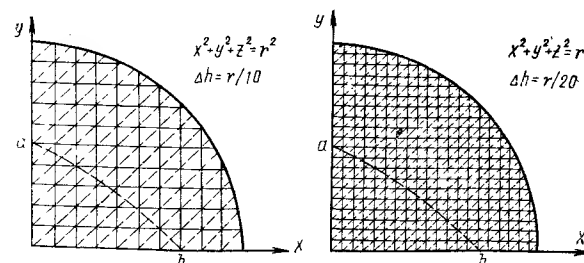


Рис. 15. Разбивка поверхности сферы на треугольные элементы



кой и динамической реакций сооружения заданной первоначальной геометрии на прилагаемые внешние силы.

Деформации пневматических сооружений в результате действия нагрузок довольно велики, поэтому расчет оболочек содержит нелинейные задачи, учитывающие геометрические и физические нелинейные зависимости. Однако в большинстве случаев нелинейное поведение материалов во внимание не принимается, так как диапазон напряжений самой оболочки практически не слишком велик.

Хотя первоначальные попытки анализа оболочки носили характер решения дифференциальных уравнений, записанных для непрерывно изогнутой поверхности, применение матричных методов было признано более целесообразным и практичным для оболочек произвольной формы.

В последнее время многие авторы анализировали геометрические нелинейные задачи пневматических сооружений, используя метод матриц перемещений. Результатов аналитических исследований опубликовано пока очень мало. В связи с трудностями, возникающими при решении математических задач, пожалуй, наиболее популярны сейчас численные методы. Однако некоторые попытки выполнить аналитические исследования все же предпринимались. Р. Тростель и Ф. Шлейер [10] дали исчерпывающие математические формулировки для решения некоторых задач по мембранам и мембраноподобным оболочкам. Дж. Леонард [13] разработал метод возмущения для расчета без использования ЭВМ оболочек вращения на действие избыточного давления и эксплуатационных нагрузок.

Хотя ясно, что применение такого рода аналитических решений ограничено, изучение физического характера работы оболочек простой формы оказалось желательным для получения более полного представления об их поведении.

Метод конечных элементов. Для анализа сооружений используют идеализированный конечный элемент и возможности системы счисления с помощью матриц. Методу конечных элементов на практике отдают предпочтение из-за преимуществ, очевидных при анализе сооружений неправильной конфигурации. Этот хорошо разработанный метод анализа в сочетании с широкими возможностями, предоставляемыми вычислительными машинами, позволяет рассчитывать сложные строительные конструкции. Следствием опыта, приобретенного при использовании данного метода, явилось убеждение, что для большинства современных строительных конструкций линейаризованный расчет оказывается неадекватным.

В рассматриваемом здесь методе расчета сделана попытка сохранить гибкость применения характеристик идеализированного конечного элемента мембраны, уточнив, однако, картину поведения конструкции, для чего требуется исключить некоторые традиционные линейаризующие допущения.

Методы анализа сооружений, основанные на идеализации элемента, разделяются на методы перемещений, сил и комбинирован-

ные. Геометрические нелинейности удобнее всего изучать с помощью метода перемещений, тогда как нелинейность упругих материалов легче учитывается методом сил. Задачи, в которых следует принимать во внимание как геометрические, так и физические нелинейности, лучше всего решать, применяя комбинированный метод.

Для мембранных конструкций, таких как пневматические, сигуации, включающие геометрические нелинейности, но ограниченные линейным поведением упругого материала, образуют важный класс проблем для анализа.

Хорошо известно, что каждый из трех общих прямых методов соответствует определенной формулировке энергии. Метод перемещений эквивалентен принципу постоянства потенциальной энергии, который гласит, что все удовлетворяющие геометрической приемлемости перемещения, которые делают потенциальную энергию постоянной, удовлетворяют условиям равновесия и являются действительными перемещениями.

Основные уравнения. Основное условие равновесия внутренних и внешних сил следующее [12]:

$$\{\psi\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV - \{R\} = 0, \quad (13)$$

где $\{\psi\}$ — вектор суммы внешних и внутренних сил; $[B]$ — матрица упругих констант изотропного или ортотропного материала; $\{\sigma\}$ — вектор напряжений; $\{R\}$ — вектор внешних сил; $\{\delta\}$ — вектор перемещений.

$[B]$ определяется из соотношения для деформаций как

$$d\{\epsilon\} = [B] d\{\delta\}; \quad (14) \quad [B] = [B_0] + [B_L(\{\delta\})], \quad (15)$$

где $[B_0]$ — линейная, а B_L — нелинейная части $[B]$, зависящие от перемещений.

Отнесенные к прямоугольной системе координат перемещения u , v и w определяют деформации как:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\}; \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Поскольку необходимо использовать процесс Ньютона — Рафсона, следует найти соотношения между $d\{\delta\}$ и $d\psi$. Таким образом, взяв соответствующие варианты уравнения (13) по отношению к $d\{\delta\}$, получим:

$$d\{\psi\} = \int_V d[B]^T \{\sigma\} dV + \int_V [B]^T d\{\sigma\} dV. \quad (17)$$

Из уравнения (14) получаем

$$d\{\sigma\} = [D] d\{\epsilon\} = [D][B] d\{\delta\}, \quad (18)$$

а из уравнения (15)

$$d[B]^T = d[B_L]^T. \quad (19)$$

Следовательно,

$$d\{\psi\} = \int_V d[B_L]^T \{\sigma\} dV + [K] d\{\delta\}, \quad (20)$$

где

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV. \quad (21)$$

В уравнении (20) первое слагаемое может быть записано, как

$$\int_V d[B_L]^T \{\sigma\} dV = [K_g] d\{\delta\}, \quad (22)$$

где K_g — симметричная матрица, зависящая от уровня напряжения.

Поскольку все решения могут быть выполнены с применением одноступенчатой операции, при решении задачи полной нагрузки возникает, как и во всех нелинейных задачах, возможность неединственного решения и может быть получено физически невозможное решение. В таких случаях рекомендуется продолжать увеличение нагрузки, получая нелинейные решения для каждого шага увеличения.

В уравнении (20) матрицы $[B]$ и $[K]$ даны для треугольной плоской мембраны, при этом функции перемещения для u , v и w приняты в виде линейных функций в элементе:

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y; \\ v &= \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y; \\ w &= \alpha_7 + \alpha_8 x + \alpha_9 y; \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$[B_0] = \frac{1}{2S} \begin{bmatrix} y_{jk} & 0 & 0 & y_{ki} & 0 & 0 & y_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & x_{kj} & 0 & 0 & x_{ih} & 0 & 0 & x_{ji} & 0 \\ x_{kj} & y_{jk} & 0 & x_{ih} & y_{ki} & 0 & x_{ji} & y_{ij} & 0 \end{bmatrix}; \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= (y_{jk} u_i + y_{ki} u_j + y_{ij} u_k)/(2S); \\ \alpha_3 &= (x_{kj} u_i + x_{ih} u_j + x_{ji} u_k)/(2S); \\ \alpha_5 &= (y_{jk} v_i + y_{ki} v_j + y_{ij} v_k)/(2S); \\ \alpha_6 &= (x_{kj} v_i + x_{ih} v_j + x_{ji} v_k)/(2S); \\ \alpha_8 &= (y_{jk} w_i + y_{ki} w_j + y_{ij} w_k)/(2S); \\ \alpha_9 &= (x_{kj} w_i + x_{ih} w_j + x_{ji} w_k)/(2S); \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$B_L = \frac{1}{2S} \begin{bmatrix} \alpha_2 y_{jk} & \alpha_5 y_{jk} & \alpha_8 y_{jk} & \alpha_2 y_{ki} \\ \alpha_3 x_{kj} & \alpha_6 x_{kj} & \alpha_9 x_{kj} & \alpha_3 x_{ih} \\ \alpha_5 y_{jk} & \alpha_6 y_{jk} & \alpha_9 y_{jk} & \alpha_5 y_{ki} \\ + \alpha_2 x_{kj} & + \alpha_5 x_{kj} & + \alpha_8 x_{kj} & + \alpha_2 x_{ih} \end{bmatrix}$$

Продолжение формулы на стр. 291

$$K_{g1} = \frac{n_x}{4S} \begin{bmatrix} y_{jk}^2 & 0 & 0 & y_{jk} y_{ki} & 0 & 0 & y_{jk} y_{ij} & 0 & 0 \\ & y_{jk}^2 & 0 & 0 & y_{jk} y_{ki} & 0 & 0 & y_{jk} y_{ij} & 0 \\ & & y_{jk}^2 & 0 & 0 & y_{jk} y_{ki} & 0 & 0 & y_{jk} y_{ij} \\ \hline & & & y_{ki}^2 & 0 & 0 & y_{ki} y_{ij} & 0 & 0 \\ & & & & y_{ki}^2 & 0 & 0 & y_{ki} y_{ij} & 0 \\ & & & & & y_{ki}^2 & 0 & 0 & y_{ki} y_{ij} \\ \hline \text{Sym} & & & & & & y_{ij}^2 & 0 & 0 \\ & & & & & & & y_{ij}^2 & 0 \\ & & & & & & & & y_{ij}^2 \end{bmatrix}; \quad (27)$$

$$K_{g2} = \frac{r n_y}{4S} \begin{bmatrix} x_{kj}^2 & 0 & 0 & x_{kj} x_{ih} & 0 & 0 & x_{kj} x_{ji} & 0 & 0 \\ & x_{kj}^2 & 0 & 0 & x_{kj} x_{ih} & 0 & 0 & x_{kj} x_{ji} & 0 \\ & & x_{kj}^2 & 0 & 0 & x_{kj} x_{ih} & 0 & 0 & x_{kj} x_{ji} \\ \hline & & & x_{ih}^2 & 0 & 0 & x_{ih} x_{ji} & 0 & 0 \\ & & & & x_{ih}^2 & 0 & 0 & x_{ih} x_{ji} & 0 \\ & & & & & x_{ih}^2 & 0 & 0 & x_{ih} x_{ji} \\ \hline \text{Sym} & & & & & & x_{ji}^2 & 0 & 0 \\ & & & & & & & x_{ji}^2 & 0 \\ & & & & & & & & x_{ji}^2 \end{bmatrix}; \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_5 y_{ki} & \alpha_8 y_{ki} & \alpha_2 y_{ij} & \alpha_5 y_{ij} & \alpha_8 y_{ij} \\ \alpha_3 x_{ih} & \alpha_9 x_{ih} & \alpha_3 x_{ji} & \alpha_6 x_{ji} & \alpha_9 x_{ji} \\ \alpha_9 y_{ki} & \alpha_9 y_{ki} & \alpha_8 y_{ij} & \alpha_6 y_{ij} & \alpha_9 y_{ij} \\ + \alpha_5 x_{ih} & + \alpha_8 x_{ih} & + \alpha_2 x_{ji} & + \alpha_5 x_{ji} & + \alpha_8 x_{ji} \end{aligned} \right\}; \quad (26)$$

(29)

[illegible]

где n — мембранные усилия, зависящие от степени напряжения; S — площадь элемента.

Геометрическая матрица жесткости

$$K_g = K_{g1} + K_{g2} + K_{g3}. \quad (30)$$

Поскольку ткань с покрытием обычно обладает ортотропными характеристиками, это следует учесть при расчете.

В таком случае матрица $[D]$ выглядит следующим образом [11]:

$$[D] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

где

$$\begin{aligned} k_{11} &= a_{11} \cos^4 \theta + a_{22} \sin^4 \theta + 2(a_{12} + 2a_{33}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \\ k_{12} &= a_{12} + [a_{12} + a_{22} - 2(a_{12} + 2a_{33})] \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \\ k_{13} &= a_{11} \cos^3 \theta \sin \theta - a_{22} \cos \theta \sin^3 \theta - (a_{12} + 2a_{33}) (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \cos \theta \sin \theta; \\ k_{22} &= a_{11} \sin^4 \theta + a_{22} \cos^4 \theta + 2(a_{12} + 2a_{33}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \\ k_{23} &= a_{11} \cos \theta \sin^3 \theta - a_{22} \cos^3 \theta \sin \theta + (a_{12} + 2a_{33}) (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \cos \theta \sin \theta; \\ k_{33} &= a_{33} + [a_{11} + a_{22} - 2(a_{12} + 2a_{33})] \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \\ a_{11} &= E_x / (1 - \nu_x \nu_y); \quad a_{22} = E_y / (1 - \nu_x \nu_y); \\ a_{12} &= \nu_x E_y / (1 - \nu_x \nu_y) = \nu_y E_x / (1 - \nu_x \nu_y); \quad a_{33} = G_{xy}. \end{aligned}$$

Здесь $E_x, E_y, \nu_x(\nu_y), G_{xy}$ — упругие постоянные, отнесенные к главным осям; θ — угол между локальной координатной осью x и направлением E_x , измеряемым от оси x к оси y .

Метод решения. Использование метода конечных элементов приводит в итоге к системам совместных нелинейных алгебраических уравнений. Для решения этих нелинейных уравнений эффективно используется метод Ньютона—Рафсона.

Образование морщин. Если напряжения в конечном элементе не удовлетворяют условию

$$N_x N_y = N_{xy}^2, \quad (32)$$

то усилия N_x или N_y и N_{xy} приравняются нулю для следующего итерационного цикла Ньютона. Если оба главных усилия¹ станут отрицательными, то они равны нулю. В таком случае сходимость итерационного процесса Ньютона—Рафсона происходит медленно.

Узловые нагрузки от распределенного давления, приложенного к поверхности элемента, рассматриваются для деформированной оболочки. На каждом шаге увеличения нагрузки вычисляется разность между прилагаемыми нагрузками и нагрузками, приложенными к деформированной оболочке. Разность вычисляется каждый раз до тех пор, пока невязка не будет в заданных пределах.

Узловые нагрузки от распределенного по поверхности элемента давления делятся на три части в соответствии с площадями элемента, определяемыми с помощью построения описанной окружности (см. рис. 7).

¹ Определенные по деформациям (Прим. ред.).

Числовой пример. Выставочное сооружение, изображенное на рис. 1, было рассчитано численным методом на действие внутреннего давления, а также ветровой и снеговой нагрузок. Материал характеризовался следующими механическими свойствами: $E_{xt}=420$ кН/м; $E_{yt}=250$ кН/м; $\nu_x=0,25$; $\nu_y=0,42$; $G_{xyt}=3$ кН/м.

Эти значения были получены при одноосном испытании на растяжение, которому подвергалась ткань с покрытием. Зависимость «напряжение—удлинение» для тканей с покрытием нелинейная. Более того, после разгрузки образца наблюдается отклонение кривой «напряжение — удлинение» от первоначальной формы вследствие того, что такие материалы являются одновременно нелинейными и неупругими.

Тем не менее, в некоторых случаях кривые «напряжение—удлинение», полученные в результате испытания тканей с покрытием на разрыв, в ограниченном диапазоне нагрузки проявляют свойства, близкие к линейно-упругим. На это следует обратить внимание, и такой материал при практических расчетах можно рассматривать как линейно-упругий.

Результаты измерений коэффициентов Пуассона ν_x и ν_y показали их зависимость от напряжения, а также то, что измеренные коэффициенты Пуассона не удовлетворяли теории «обратных величин». Однако в целях упрощения расчета здесь приняты обычные коэффициенты Пуассона.

Жесткость при сдвиге G_{xyt} мала по сравнению с Et . Оценка напряжений не будет связана с трудностями, если величину G_{xyt} принять небольшой, что характерно для всех тканей с покрытием.

Физические константы материала установлены, как написано выше, на основе результатов измерения. Направление вдоль основы принимается за ось x , а направление по утку — за ось y . Полученные результаты показаны на рис. 16—19.

Расчет на динамические нагрузки. Немаловажным моментом при проектировании пневматических сооружений является расчет на динамические нагрузки. Хотя некоторые авторы рассматривали эффекты завихрения и аэродинамической неустойчивости, основной строительной динамической проблемой, по-видимому, остается учет порывов ветра.

Для определения основных характеристик сооружения рассмотрим простую динамическую нагрузку с помощью модели из конечных элементов, изображенной на рис. 20.

Для нелинейных динамических задач, включающих значительные перемещения и зависящие от них внешние силы, уравнение движения может быть записано следующим образом:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F, \quad (33)$$

где M — матрица масс; C — матрица демпфирования; $K=K(\delta)$ — матрица жесткости; $F=F(t, \delta)$ — вектор нагрузки; $\ddot{X}$, $\dot{X}$, X — ускорения, скорости и перемещения.

Метод решения. Расчеты общей динамической реакции нелинейных систем, в которых используются шаговые процедуры чис-

Рис. 16. Распределение аэродинамических коэф-фициентов

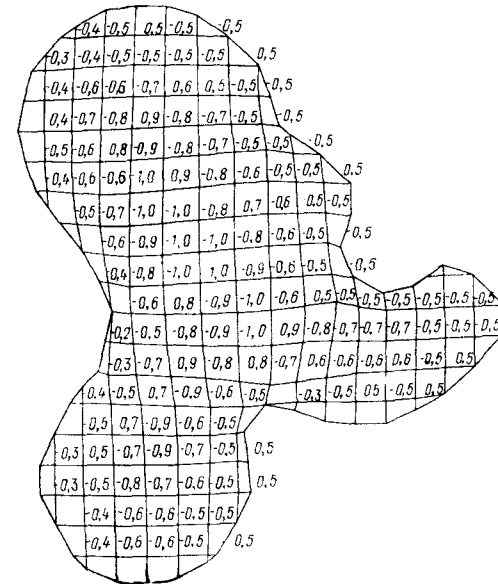


Рис. 17. Усилия в оболочке (N_x —основа; N_y —уток) под действием внутреннего давления и ветра (внутреннее давление 0,5 Па, скорость ветра 40 м/с); $E_{xt}=420$ кН/м, $E_{yt}=250$ кН/м, $\nu_x=0,25$, $\nu_y=0,42$, $G_{xyt}=3$ кН/м, $\max N_y=8,04$ Н/м, $\max N_x=11,27$ кН/м, $\max N_{xy}=2,27$ кН/м

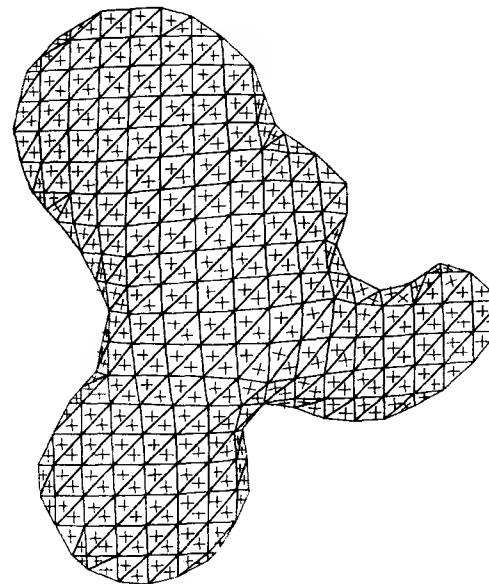
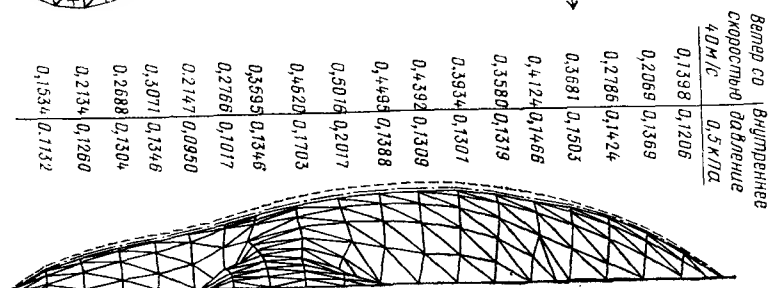


Рис. 18. Вертикальные перемещения, м, под действием ветра и внутреннего давления; сплошные линии — начальная форма; штриховые линии — конечная форма (ветровая нагрузка); штрихпунктирные линии — исходная форма (внутреннее давление)



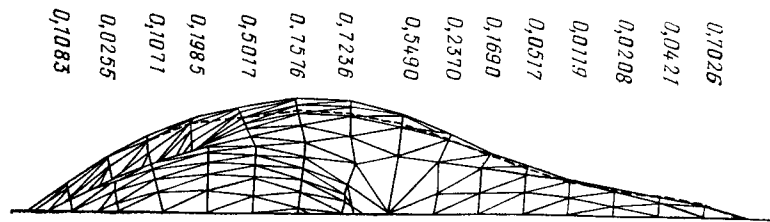


Рис. 19. Вертикальные перемещения, м, под действием снеговой нагрузки 0,40 кПа; сплошные линии — начальная форма; штриховые линии — конечная форма под снеговой нагрузкой

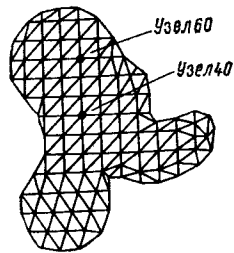


Рис. 20. Деление на элементы для динамического расчета

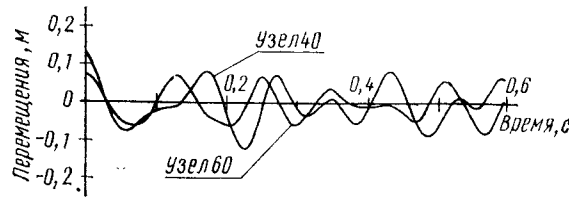


Рис. 21. Реакция на вынужденные перемещения (перемещения были вычислены путем статического расчета на действие максимальной ветровой нагрузки)

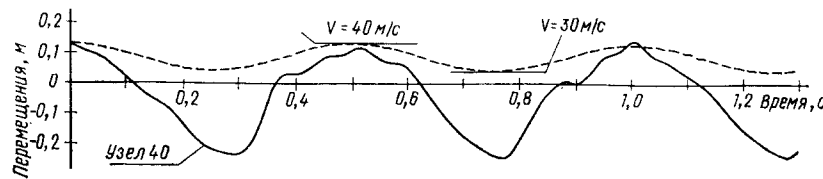


Рис. 22. Реакция на пульсирующую нагрузку (ветровая нагрузка + внутреннее давление 0,5 кПа)

ленного интегрирования, могут быть осуществлены путем разделения общего времени на последовательные конечные приращения (инкременты) времени и вычисления реакции по окончании каждого инкремента Δt в виде первоначальных условий и нагрузки в течение инкремента. В этой статье для решения уравнения (33) применен β -метод Ньюмарка.

β -метод Ньюмарка. В этом методе скорость и перемещение в конце инкремента времени Δt выражаются через ускорения, скорости и перемещения в начале инкремента времени, а также через ускорения в конце инкремента времени.

Эти уравнения принимают вид:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \dot{X}(t) + \{(\Delta t)^2/2\} \ddot{X}(t) + \beta (\Delta t)^2 \{\ddot{X}(t + \Delta t) - \ddot{X}(t)\}; \quad (34)$$

$$\dot{X}(t + \Delta t) = \dot{X}(t) + \Delta t \{\ddot{X}(t) + \ddot{X}(t + \Delta t)\}/2, \quad (35)$$

а ускорение в конце инкремента времени дается в виде:

$$\ddot{X}(t + \Delta t) = \{M + (\Delta t/2) C + \beta (\Delta t)^2 K\}^{-1} [F(t + \Delta t) - C \{\dot{X}(t) + \Delta t \ddot{X}(t)/2\} - K \{X(t) + \Delta t \dot{X}(t) + (1/2 - \beta) (\Delta t)^2 \ddot{X}(t)\}], \quad (36)$$

где β — параметр интегрирования.

При $\beta = 1/6$ имеем хорошо известный метод линейного ускорения.

Численные результаты. Сооружение, показанное на рис. 1, было представлено конечными элементами, как показано на рис. 20.

Жесткость элемента, являющаяся нелинейной, определяется уравнениями (24) — (31), и предполагается наличие присоединенных масс. Для получения основных характеристик сооружения нужно рассмотреть задачу свободных колебаний (рис. 21).

Материал ортотропен и имеет следующие показатели: $E_x = 420$ МПа, $E_y = 250$ МПа, $G_{xy} = 3$ МПа, толщина материала $t = 0,1$ см.

Скорость ветра V может быть разделена на компонент средней скорости $\bar{v}$ и компонент флуктуации v :

$$V = \bar{v} + v. \quad (37)$$

Средняя скорость ветра вызывает давление

$$q = c v^2 / 16, \quad (38)$$

которое может быть добавлено к постоянным нагрузкам на оболочку, образуя вектор нагрузки $\{R\}$. Равновесное состояние может быть установлено путем статического расчета. Представление о флуктуационной скорости ветра получить гораздо труднее; имеется мало информации относительно пространственного распределения давления ветра как временной функции. Представление о ветре, таким образом, дают скорости, показанные на рис. 22.

Большая часть энергии в турбулентном потоке сконцентрирована в диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц. Следовательно, если сооружение таково, что ни одна из частот не входит в данный диапазон, динамический эффект ветровой нагрузки не будет преобладающей частью ее воздействия. Пневматические сооружения приобретают жесткость в результате внутреннего давления, их вес в нормальных условиях очень мал. Поскольку частота меняется обратно пропорционально массе, частота колебаний таких систем очень высока, и они не попадают в категорию сооружений, которые могут оказаться под динамическим воздействием ветровой нагрузки, за исключением случаев чрезвычайно низкого внутреннего давления.

Для получения более точных результатов должны быть учтены следующие моменты:

- оценка сил ветра;
- разница в результатах между LM и CM для матрицы масс;
- влияние размера ячейки элемента;
- оценка коэффициента затухания;
- влияние присоединенной массы;
- взаимодействие между внутренним давлением и ветром.

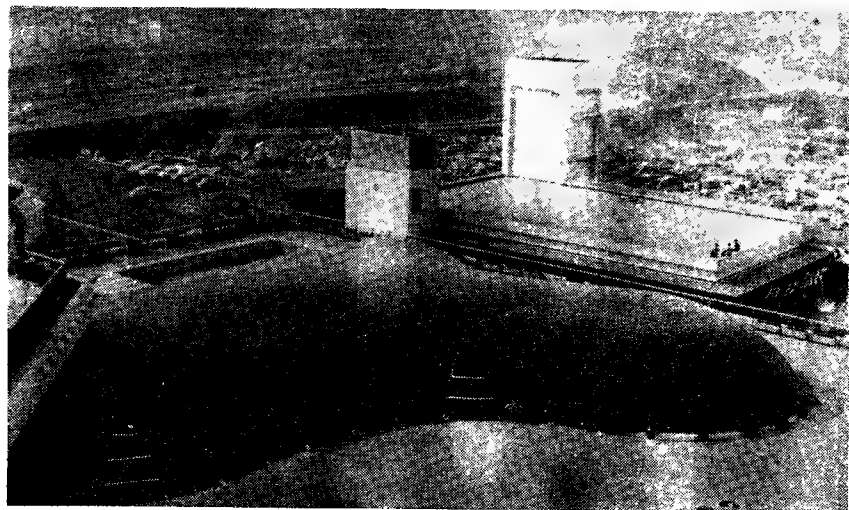


Рис. 23. Смонтированная оболочка

Заключение. Законченная конструкция, для которой использована полиэфирная ткань, покрытая ПВХ, показана на рис. 23. Она имеет следующие характеристики: переплетение — простое; масса — 993 г/м^2 ; толщина — $0,93 \text{ мм}$; прочность полоски на разрыв: по основе — $3,40 \text{ кН/3 см}$, по утку — $2,83 \text{ кН/3 см}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barnes, M. R., «Form-Finding of Minimum Surface Membranes», Proc. of I. A. S. S. World Congress on Space Enclosures, Montreal, 1976.
2. Haug, E., «Finite Element Analysis of Non-linear Membrane Structures», Proc. of I. A. S. S. Pacific Symposium on Tension Structures and Space Frames, Tokyo, 1971.
3. Ishii, K., «Shape of Membrane Structures», Proc. of I. A. S. S. Pacific Symposium on Tension Structures and Space Frames, Tokyo, 1971.
4. Ishii, K., «On Developing of curved surface of Pneumatic Structures», Proc. of I. A. S. S. International Symposium on Air-Supported Structures, Delft, 1972.
5. Ishii, K., «Analytical Shape Determination for Membrane Structures», Proc. of I. A. S. S. World Congress on Space Enclosures, Montreal, 1976.
6. Ishii, K., «An Approach to Structural Design of a Pneumatic Structures», Proc. of I. A. S. S. International Symposium on Air-Supported Structures, Venezia, 1977.
7. Ishii, K., «Form Finding Methods of Pneumatic Structures», Research Report of IASS Working Group of Pneumatic Structures, 1978, West Virginia.
8. Knudson, W. C., «Response of Cable net Structures under Dynamic Loadings», Proc. of I. A. S. S. Pacific Symposium on Tension Structures and Space Frames, Tokyo, 1971.
9. Newmark, N., «A Method of Computation for Structural Dynamics», ASCE EM3, July, 1959.
10. Otto, F., Trostel, R., «Tensile Structures I.» The MIT Press, 1967.

11. Uemura, M., «Deformation and Stress of Orthotropic Rectangular Membrane under Uniform Lateral Pressure», Proc. of I. A. S. S. Pacific Symposium on Tension Structures and Space Frames, Tokyo, 1971.
12. Zienkiewicz, O. C., «The Finite Element Method in Engineering Science». McGRAW—HILL Publishing Co. 1971.
13. Leonard, J. W., «Inflatable Shells: Pressurization Phase», Journal of the engineering mechanics div., ASCE Vol. 93, EM2, April, 1967.
14. Task Committee on Air-Supported Structures ASCE «State-of Art Report on Air Supported Structures», Published by ASCE, 1979.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕК И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В. И. Усюкин (СССР)

Теория мягких оболочек занимает важное место в механике деформируемого твердого тела и имеет много практических приложений. Работоспособность различных типов мягких конструкций, применяемых в судостроении, машиностроении, воздухоплавании и космической технике, определяется в значительной степени теоретическим анализом. Особое место занимает теория при создании пневматических строительных конструкций. Проблемы не только прочности и деформативности, но также долговечности и эксплуатации конструкции решаются с помощью теории мягких оболочек.

Современные тенденции развития теоретических исследований связаны с дальнейшим расширением свойств как частных, так и общих моделей путем учета новых явлений, новых факторов, позволяющих более полно отразить поведение объекта. До недавнего времени расчет конструкций из мягких оболочек основывался на линейной безмоментной теории. В рамках этой схемы в большинстве случаев не удавалось определить деформированную форму оболочки и учесть влияние изменения геометрии на напряженное состояние.

Наиболее полное описание поведения конструкций связано с теорией больших деформаций мягких оболочек, учитывающей нелинейность характеристик материала и справедливой при перемещениях и деформациях, не ограниченных по величине. Вопросы теории больших деформаций мягких оболочек в различных вариантах разрабатывались в работах [1—3]. Общая система уравнений мягкой оболочки произвольной геометрии при больших деформациях и перемещениях получена в работе [4].

Однако расчетные схемы, в которых используются строгие теории при проведении практических расчетов, оказываются в большинстве случаев весьма сложными. Многие конструкции, кроме того, работают в условиях, при которых большие деформации и большие изменения геометрии недопустимы. К ним, в частности, относится большинство пневматических строительных конструкций.

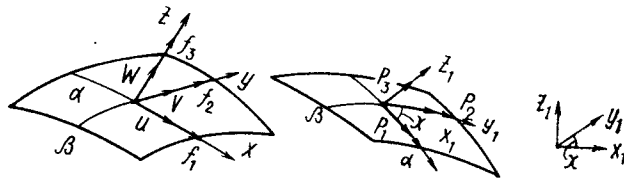


Рис. 1

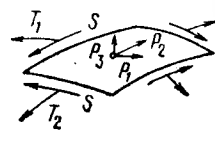


Рис. 2

Наиболее приемлемой при расчетах оказывается приближенная, так называемая техническая теория мягких оболочек, справедливая при малых деформациях и использующая линеаризацию при составлении системы уравнений.

Основная идея технической теории состоит в том, что усилия, действующие в оболочке в деформированном состоянии, представляются в виде суммы основных и дополнительных слагаемых. Первые члены соответствуют безмоментной теории оболочек и определяются из уравнений равновесия, записанных для начальной (раскройной) или некоторой промежуточной формы оболочки, которая считается известной. Дополнительные усилия корректируют значения основных членов. Они отражают влияние изменения геометрии оболочки на ее напряженное состояние. На тех участках оболочки, где изменения геометрии при деформировании невелики, величины дополнительных слагаемых малы. Дополнительные усилия могут быть определены при решении задачи только из полной системы уравнений. Линеаризация уравнений равновесия проводится относительно состояния оболочки, соответствующего начальной форме, и усилий, определенных для нее. Таким же образом упрощается выражение для полной потенциальной энергии оболочки, которое применяется при решении задач вариационными методами.

Техническая теория — наиболее простой вариант теории мягких оболочек. Являясь как бы первым приближением общей теории, она в то же время учитывает наиболее существенные свойства мягких оболочек и позволяет получить весьма достоверные решения многих практически важных проблем. На ее основе в настоящее время построен ряд алгоритмов, созданы и широко используются программы расчета сложных конструкций.

1. Основные уравнения общей теории. Остановимся кратко на уравнениях теории больших деформаций. Следуя обозначениям работы [4], положим, что недеформированная геометрия оболочки определяется линиями главных кривизн α и β , коэффициентами первой квадратичной формы A, B и главными радиусами кривизны R_1, R_2 .

По касательной к линиям α и β (рис. 1) проведены оси x и y , которые вместе с направленной вдоль внешней нормали осью z образуют правый подвижный трехгранник. На деформированной поверхности оси x_1 и y_1 касательные к линиям α и β пересекаются под углом χ . Нормаль к плоскости x_1, y_1 соответствует оси z_1 . Век-

тор полного перемещения точки поверхности на оси xyz имеет составляющие u, v, w :

$$\{u\} = \{u v w\}^T. \quad (1.1)$$

Удлинения линейных элементов, отнесенные к начальным размерам вдоль линий α и β , равны соответственно e_1 и e_2 , косинус угла между осями x_1 и y_1 равен $\cos \chi = \omega$.

Полные нелинейные соотношения между e_1, e_2, ω и перемещениями приведены в статье [4]:

$$\left. \begin{aligned} (1 + e_1)^2 &= (1 + \varepsilon_1)^2 + \gamma_1^2 + \vartheta_1^2; & (1 + e_2)^2 &= (1 + \varepsilon_2)^2 + \gamma_2^2 + \vartheta_2^2; \\ \omega (1 + e_1) (1 + e_2) &= \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_1 \varepsilon_2 + \gamma_2 \varepsilon_1 + \vartheta_1 \vartheta_2, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \vartheta_2$ — составляющие векторов

$$\{\varepsilon 1\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \gamma_1 \\ -\vartheta_1 \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon 2\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_2 \\ \gamma_2 \\ -\vartheta_2 \end{Bmatrix}. \quad (1.3)$$

Они связаны с перемещениями следующим образом:

$$\{\varepsilon 1\} = [B1] \{u\} \quad \{\varepsilon 2\} = [B2] \{u\}. \quad (1.4)$$

Матрицы $[B1]$ и $[B2]$ кососимметричны, имеют размер 3×3 и равны

$$\begin{aligned} [B1] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} & \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} & \frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} & \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 & \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \end{bmatrix}; \\ [B2] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} & -\frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} & 0 \\ \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} & \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} & \frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Каждая из осей x_1, y_1, z_1 на деформированной поверхности оболочки составляет с осями xyz углы, определяемые направляющими косинусами:

$$\begin{aligned} l_1 &= \cos(x_1 x); & l_2 &= \cos(y_1 x); & l_3 &= \cos(z_1 x); \\ m_1 &= \cos(x_1 y); & m_2 &= \cos(y_1 y); & m_3 &= \cos(z_1 y); \\ n_1 &= \cos(x_1 z); & n_2 &= \cos(y_1 z); & n_3 &= \cos(z_1 z). \end{aligned}$$

Через $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \vartheta_2$ направляющие косинусы выражаются следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= \frac{1 + \varepsilon_1}{1 + e_1}; & m_1 &= \frac{\gamma_1}{1 + e_1}; & n_1 &= \frac{-\vartheta_1}{1 + e_1}; \\ l_2 &= \frac{\gamma_2}{1 + e_2}; & m_2 &= \frac{1 + \varepsilon_2}{1 + e_2}; & n_2 &= \frac{-\vartheta_2}{1 + e_2}; \\ l_3 &= c[(1 + \varepsilon_2)\vartheta_1 - \gamma_1\vartheta_2]; & m_3 &= c[(1 + \varepsilon_1)\vartheta_2 - \gamma_2\vartheta_1]; \\ & n_3 &= c[(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2) - \gamma_1\gamma_2]; \\ c &= [(1 + e_1)(1 + e_2)\sqrt{1 - \omega^2}]^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

По граням элемента деформированной оболочки (рис. 2) действуют усилия T_1, T_2, S . Касательные усилия вдоль линий α и β равны между собой.

Условие равновесия элемента оболочки согласно принципу возможных перемещений имеет вид

$$\delta V - \delta A = 0, \quad (1.7)$$

где δV — работа усилий T_1, T_2, S при деформировании элемента, соответствующем возможным перемещениям [4];

$$\delta V = \iint [T_1(1 + e_2)\delta\varepsilon_1 + T_2(1 + e_1)\delta\varepsilon_2 + S\delta[\omega(1 + e_1)(1 + e_2)]] AB d\alpha d\beta. \quad (1.8)$$

Работа поверхностных и краевых сил, действующих на оболочку, определяется соотношением

$$\delta A = \iint [f_1\delta u + f_2\delta v + f_3\delta w](1 + e_1)(1 + e_2)\sqrt{1 - \omega^2} AB d\alpha d\beta + \int [T_1^0\delta u + S^0\delta v + Q^0\delta w](1 + e_2)B d\beta. \quad (1.9)$$

Проекции поверхностей нагрузки f_1, f_2, f_3 на оси x, y, z совершают работу на возможных перемещениях $\delta u, \delta v, \delta w$, соответствующую первому слагаемому уравнения (1.9). Второе слагаемое — работа погонных сил $T_1^0; S^0; Q^0$, приложенных вдоль края оболочки ($\alpha = \text{const}$). При наличии подобных усилий на других краях оболочки к уравнению (1.9) должны быть добавлены соответствующие члены. Составляющие поверхностей нагрузки f_1, f_2, f_3 образуют вектор

$$\{f\} = \{f_1 f_2 f_3\}^T.$$

Если обозначить через p_1, p_2, p_3 проекции распределенной нагрузки на оси x_1, y_1, z_1 и представить вектор $\{p\}$ в виде

$$\{p\} = \{p_1 p_2 p_3\}^T,$$

то связь между $\{f\}$ и $\{p\}$ определится матрицей $[M]$

$$\{f\} = [M]\{p\}; \quad (1.10)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}.$$

Каждый член матрицы — направляющий косинус (1.6). Соотношение (1.10) позволяет выразить вектор $\{p\}$ через $\{f\}$:

$$\{p\} = [M]^{-1}\{f\}.$$

Подставим в вариационное уравнение (1.7) зависимости (1.8), (1.9), (1.2). Использование формул Остроградского—Гаусса для криволинейных координат позволяет получить уравнения равновесия и естественные граничные условия. Скалярная форма уравнений равновесия имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} (T_1^* B) + \frac{\partial}{\partial \beta} (SA) \right] (1 + \varepsilon_1) - \left[\frac{\partial}{\partial \beta} (T_2^* A) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (SB) \right] \gamma_2 + \\ & + T_1^* \left[\frac{AB}{R_1} \vartheta_1 - \frac{\partial A}{\partial \beta} \gamma_1 - B \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \alpha} \right] + T_2^* \left[\frac{\partial B}{\partial \alpha} (1 + \varepsilon_2) - A \frac{\partial \gamma_2}{\partial \beta} \right] + \\ & + S \left[\frac{\partial B}{\partial \alpha} \gamma_1 - \frac{\partial A}{\partial \beta} (1 + \varepsilon_2) + \frac{AB}{R_1} \vartheta_2 - B \frac{\partial \gamma_2}{\partial \alpha} - A \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \right] = f_1 AB \frac{1}{c}; \quad (1.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{\partial}{\partial \beta} (T_2^* A) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (SB) \right] (1 + \varepsilon_2) - \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} (T_1^* B) + \frac{\partial}{\partial \beta} (SA) \right] \gamma_1 + \\ & + T_2^* \left[\frac{AB}{R_2} \vartheta_2 - \frac{\partial B}{\partial \alpha} \gamma_2 - A \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial \beta} \right] + T_1^* \left[\frac{\partial A}{\partial \beta} (1 + \varepsilon_1) - B \frac{\partial \gamma_1}{\partial \alpha} \right] + \\ & + S \left[\frac{\partial A}{\partial \beta} \gamma_2 - \frac{\partial B}{\partial \alpha} (1 + \varepsilon_1) + \frac{AB}{R_2} \vartheta_1 - A \frac{\partial \gamma_1}{\partial \beta} - B \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial \alpha} \right] = f_2 AB \frac{1}{c}; \quad (1.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} (T_1^* B) + \frac{\partial}{\partial \beta} (SA) \right] \vartheta_1 + \left[\frac{\partial}{\partial \beta} (T_2^* A) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (SB) \right] \vartheta_2 + \\ & + T_1^* \left[\frac{AB}{R_1} (1 + \varepsilon_1) + B \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \alpha} \right] + T_2^* \left[\frac{AB}{R_2} (1 + \varepsilon_2) + A \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \beta} \right] + \\ & + S \left[\frac{AB}{R_1} \gamma_2 + \frac{AB}{R_2} \gamma_1 + B \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \alpha} + A \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \beta} \right] = f_3 AB \frac{1}{c}. \quad (1.13) \end{aligned}$$

Здесь T_1^* и T_2^* соответствуют значениям обобщенных усилий

$$T_1^* = T_1(1 + e_2)/(1 + e_1); \quad T_2^* = T_2(1 + e_1)/(1 + e_2).$$

Уравнения равновесия (1.11)—(1.13) записаны для ортогональных осей x, y, z , которые направлены вдоль координатных линий, введенных на недеформированной поверхности оболочки, и по нормали.

Построим систему силовых граничных условий для оболочки. Если рассмотреть только край оболочки, совпадающий с линией β ($\alpha = \text{const}$), то из вариационных соотношений (1.7)—(1.9) получаются силовые граничные условия, которые представляются в виде

$$\left. \begin{aligned} & T_1(1 + \varepsilon_1)(1 + e_1)^{-1} + S\gamma_2(1 + e_2)^{-1} - T_1^0; \\ & T_1\gamma_1(1 + e_1)^{-1} + S(1 + \varepsilon_2)(1 + e_2)^{-1} - S^0; \\ & T_1\vartheta_1(1 + e_1)^{-1} + S\vartheta_2(1 + e_2)^{-1} - Q_1^0. \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Первые два соотношения соответствуют равенству внутренних и краевых сил, направленных вдоль осей x и y . Третье уравнение по-

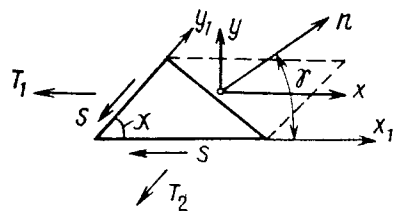


Рис. 3

казывает, что усилие, приложенное по нормали к начальной поверхности оболочки, деформирует ее так, что уравнивание осуществляется только проекциями сил T_1 и S .

Полученные зависимости должны быть дополнены уравнениями, отражающими свойства материала, из которого изготовлена оболочка.

Эти уравнения могут иметь различ-

ную форму. Их выводят по результатам экспериментов или на основе теоретических соображений, но связь между усилиями и деформациями должна быть в рассматриваемой постановке однозначной.

2. Условия образования складок. Система уравнений, полученная выше, справедлива для мягких оболочек, находящихся в двухосном напряженном состоянии. При определенных условиях на поверхности оболочки или в отдельных ее зонах могут появиться складки, что является результатом возникновения сжимающих усилий. Оболочка как бы теряет устойчивость от усилий, действующих перпендикулярно направлению складок. Эти усилия малы по величине и при расчете принимаются равными нулю [1]. Считается, что такая зона образуется системой нитей, направление которых совпадает с положением главных растягивающих усилий.

Получим условия образования складчатых участков. Рассмотрим треугольный элемент поверхности, который вырезан из четырехугольника (рис. 3), соответствующего деформированному состоянию оболочки. Вдоль граней x_1 и y_1 в косоугольной системе координат действуют силы T_1 , S и T_2 , S . Приложим к третьей стороне треугольника усилия X и Y так, чтобы вектор X совпадал с направлением x_1 , а Y был перпендикулярен ему. Нормаль к этой стороне треугольника составляет с осью x_1 угол γ . Спроектируем все силы, действующие на элемент, на направления векторов X и Y :

$$\left. \begin{aligned} X \sin \chi &= T_1 \cos \gamma + T_2 \cos \chi \cos \gamma \sin \chi (\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{ctg} \chi) + \\ &+ S \cos \gamma \sin \chi (2 \operatorname{ctg} \chi + \operatorname{tg} \gamma); \\ Y &= S \cos \gamma + T_2 \sin \chi \cos \gamma (\operatorname{ctg} \chi + \operatorname{tg} \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Найдем такие значения углов γ , при которых касательные составляющие вдоль линии ab отсутствуют. Если обозначить нормальную составляющую σ , то в этом случае X и Y равны

$$X = \sigma \cos \gamma; \quad Y = \sigma \sin \gamma. \quad (2.2)$$

Подставив эти соотношения в выражение (2.1), получим главные усилия в виде

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{\sin \chi} \frac{1}{2} (T_1 + T_2 + 2S \cos \chi) \pm \sqrt{\frac{1}{4} (T_1 + T_2 + 2S \cos \chi)^2 - \frac{1}{\sin^2 \chi} (T_1 T_2 - S^2)}.$$

Знак плюс в этом уравнении соответствует большему главному усилию. При возникновении складок меньшее главное усилие должно быть равно нулю. Отсюда следует условие образования складок

$$T_1 T_2 - S^2 = 0. \quad (2.3)$$

Если левая часть уравнения больше нуля, то складки в этой зоне оболочки отсутствуют.

Направление складок может быть определено из уравнения (2.1). Когда $\sigma = 0$, угол γ находится из соотношения

$$\operatorname{tg} \gamma = - \frac{S + T_2 \omega}{T_2 \sqrt{1 - \omega^2}},$$

где $\omega = \cos \chi$.

3. Общие уравнения технической теории. Далее на основе приведенных строгих соотношений теории мягких оболочек построены уравнения технической теории. При малых деформациях значения ϵ , γ и ϕ соответствуют относительному удлинению, составляющей угла сдвига и углу поворота нормали к поверхности оболочки. Следовательно, соотношениями (1.4) определяются зависимости между векторами деформаций и вектором перемещений.

Усилия, действующие в оболочке, представляются в виде сумм

$$T_1 = T_{10} + \bar{T}_1; \quad T_2 = T_{20} + \bar{T}_2; \quad S = S_0 + \bar{S}. \quad (3.1)$$

Первые слагаемые отнесены к начальной форме и считается, что они находятся из уравнений равновесия безмоментной теории оболочек при поверхностных нагрузках f_{10} ; f_{20} ; f_{30} .

Полные составляющие поверхностных нагрузок также разделяются на две части:

$$f_1 = f_{10} + \bar{f}_1; \quad f_2 = f_{20} + \bar{f}_2; \quad f_3 = f_{30} + \bar{f}_3. \quad (3.2)$$

Усилия T_{10} , T_{20} , S_0 и нагрузки f_{10} ; f_{20} , f_{30} соответствуют состоянию оболочки, называемому основным. Разделение внешней нагрузки удобнее всего проводить так, чтобы первые слагаемые в выражении (3.1) описывались плавно изменяющимися функциями. В этом случае решение задачи для определения основного напряженного состояния будет наиболее простым. Нужно отметить, что разделение поверхностных внешних усилий (3.1) не обязательно. Во многих случаях можно относить всю внешнюю нагрузку к основному состоянию.

Рассмотрим условие равновесия мягкой оболочки (1.7). Воспользовавшись разделением усилий (3.1), представим их работу на возможных перемещениях в виде трех слагаемых

$$\delta V = \delta V_0 + \delta V_1 + \delta V_2. \quad (3.3)$$

Первое слагаемое соответствует работе сил основного состояния или, иначе, безмоментной теории оболочек:

$$\delta V_0 = \iint [T_{10} \delta \epsilon_1 + T_{20} \delta \epsilon_2 + S_0 \delta \gamma_1 + S_0 \delta \gamma_2] AB \, d\alpha \, d\beta. \quad (3.4)$$

В выражении для δV_1 будем учитывать лишь деформации и углы поворота, умноженные на усилия основного состояния, а также дополнительные усилия

$$\begin{aligned} \delta V_1 = \iint [& \bar{T}_1 \delta \varepsilon_1 + \bar{T}_2 \delta \varepsilon_2 + \bar{S} \delta \gamma_1 + \bar{S} \delta \gamma_2 + \\ & + T_{10} \varepsilon_2 \delta \varepsilon_1 + T_{10} \gamma_1 \delta \gamma_1 + T_{10} \vartheta_1 \delta \vartheta_1 + T_{20} \varepsilon_1 \delta \varepsilon_2 + T_{20} \gamma_2 \delta \gamma_2 + T_{20} \vartheta_2 \delta \vartheta_2 + \\ & + S_0 \varepsilon_1 \delta \gamma_2 + S_0 \varepsilon_2 \delta \gamma_1 + S_0 \gamma_2 \delta \varepsilon_1 + S_0 \gamma_1 \delta \varepsilon_2 + S_0 \vartheta_1 \delta \vartheta_2 + S_0 \vartheta_2 \delta \vartheta_1] AB d\alpha d\beta. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Именно составляющая работы внутренних сил δV_1 занимает основное место в технической теории мягких оболочек. Она позволяет значительно расширить возможности безмоментной теории и получить непротиворечивые решения. В выражение для δV_2 входят члены, которые при малых значениях деформаций незначительны и в технической теории мягких оболочек не учитываются.

Работа поверхностной нагрузки на возможных перемещениях определяется первым слагаемым соотношения (1.9). Представим ее также в виде трех слагаемых

$$\delta A = \delta P + \delta R; \quad \delta P = \delta P_0 + \delta P_1 + \delta P_2. \quad (3.6)$$

В соответствии с разделением поверхностных сил на основные и дополнительные работу основных сил представим в виде

$$\delta P_0 = \iint [f_{10} \delta u + f_{20} \delta v + f_{30} \delta w] AB d\alpha d\beta. \quad (3.7)$$

Слагаемое δP_1 получено в результате линеаризации первого слагаемого подынтегрального выражения (1.9):

$$\begin{aligned} \delta P_1 = \iint [& \bar{f}_1 \delta u + \bar{f}_2 \delta v + \bar{f}_3 \delta w + f_{10} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \delta u + \\ & + f_{20} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \delta v + f_{30} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \delta w] AB d\alpha d\beta. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Третий член в выражении (3.6) соответствует нелинейным составляющим работы внешних сил и здесь не учитывается.

Работу краевых сил также будем рассматривать состоящей из трех слагаемых: основного, дополнительного и остаточного члена, определяемого нелинейными составляющими деформаций:

$$\delta R = \delta R_0 + \delta R_1 + \delta R_2.$$

Каждую составляющую правой части можно найти, если разделить краевую нагрузку на основную и дополнительную.

Условие равновесия (1.7) теперь можно рассматривать раздельно:

$$\delta V_0 - \delta P_0 - \delta R_0 = 0; \quad (3.9)$$

$$\delta V_1 - \delta P_1 - \delta R_1 = 0. \quad (3.10)$$

Первое соотношение относится к основному состоянию и соответствует линейной безмоментной теории. Второе является главным при построении линеаризованных соотношений технической теории мягких оболочек.

Воспользуемся зависимостями Остроградского — Гаусса и получим из соотношений (1.7), (3.5), (3.8) уравнения равновесия оболочки в криволинейных координатах и граничные условия. За-

метим, что те же уравнения можно получить, если провести прямую линеаризацию полных зависимостей (1.11) — (1.13):

$$\begin{aligned} - \frac{\partial}{\partial \alpha} (\bar{T}_1 B) - \frac{\partial}{\partial \beta} (\bar{S} A) + \bar{T}_2 \frac{\partial B}{\partial \alpha} - \bar{S} \frac{\partial A}{\partial \beta} - \frac{\partial}{\partial \alpha} (T_{10} B \varepsilon_2) - \frac{\partial}{\partial \alpha} (S_0 B \gamma_2) + \\ + T_{20} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \varepsilon_1 + S_0 \frac{\partial B}{\partial \alpha} \gamma_1 - T_{10} \frac{\partial A}{\partial \beta} \gamma_1 - S_0 \frac{\partial A}{\partial \beta} \varepsilon_2 - \frac{\partial}{\partial \beta} (T_{20} A \gamma_2) - \\ - \frac{\partial}{\partial \beta} (S_0 A \varepsilon_1) + \frac{AB}{R_1} T_{10} \vartheta_1 + \frac{AB}{R_1} S_0 \vartheta_2 = [\bar{f}_1 + f_{10} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] AB; \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} - \frac{\partial}{\partial \beta} (\bar{T}_2 A) - \frac{\partial}{\partial \alpha} (\bar{S} B) + \bar{T}_1 \frac{\partial A}{\partial \beta} - \bar{S} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - \frac{\partial}{\partial \beta} (T_{20} A \varepsilon_1) - \frac{\partial}{\partial \beta} (S_0 A \gamma_1) + \\ + T_{10} \frac{\partial A}{\partial \beta} \varepsilon_2 + S_0 \frac{\partial A}{\partial \beta} \gamma_2 - T_{20} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \gamma_2 - S_0 \frac{\partial B}{\partial \alpha} \varepsilon_1 - \frac{\partial}{\partial \alpha} (T_{10} B \gamma_1) - \\ - \frac{\partial}{\partial \alpha} (S_0 B \varepsilon_2) + \frac{AB}{R_2} T_{20} \vartheta_2 + \frac{AB}{R_2} S_0 \vartheta_1 = [\bar{f}_2 + f_{20} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] AB; \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 \frac{AB}{R_1} + \bar{T}_2 \frac{AB}{R_2} + T_{10} \frac{AB}{R_1} \varepsilon_2 + T_{20} \frac{AB}{R_2} \varepsilon_1 + S_0 \frac{AB}{R_1} \gamma_2 + S_0 \frac{AB}{R_2} \gamma_1 + \\ + \frac{\partial}{\partial \alpha} (T_{10} B \vartheta_1) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (S_0 B \vartheta_2) + \frac{\partial}{\partial \beta} (T_{20} A \vartheta_2) + \frac{\partial}{\partial \beta} (S_0 A \vartheta_1) = [\bar{f}_3 + f_{30} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] AB. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Правые части этих уравнений могут быть представлены иначе — через составляющие поверхностной нагрузки в координатах x_1, y_1, z_1 на деформированной поверхности. Используя соотношения (1.10), (1.6) и разделив аналогично выражению (3.2) полные поверхностные усилия на основные и дополнительные

$$p_1 = p_{10} + \bar{p}_1; \quad p_2 = p_{20} + \bar{p}_2; \quad p_3 = p_{30} + \bar{p}_3;$$

в правых частях уравнений (3.11) — (3.13) получим:

$$\begin{aligned} [\bar{p}_1 + p_{10} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + p_{20} \gamma_2 + p_{30} \vartheta_1] AB; \\ [\bar{p}_2 + p_{20} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + p_{10} \gamma_1 + p_{30} \vartheta_2] AB; \\ [\bar{p}_3 + p_{30} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - p_{10} \vartheta_1 - p_{20} \vartheta_2] AB. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Поверхностные силы p_{10}, p_{20}, p_{30} здесь определяют усилия T_{10}, T_{20}, S_0 основного состояния. Эти соотношения удобнее применять, например, при рассмотрении гидростатического нагружения оболочки или действия равномерного давления при расчете пневматических конструкций. При наличии только давления правые части уравнений имеют вид

$$p_{30} \vartheta_1 AB; \quad p_{30} \vartheta_2 AB; \quad [p_{30} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \bar{p}_3] AB.$$

Остальные слагаемые равны нулю.

Матричную форму уравнений равновесия при правых частях (3.14), поделенных на AB , можно представить в виде

$$[L1] \{T1\} + [L2] \{T2\} + [L3] \{\varepsilon1\} + [L4] \{\varepsilon2\} = -\{\bar{p}\}. \quad (3.15)$$

Здесь введены векторы

$$\{T1\} = \begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{S} \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{T2\} = \begin{Bmatrix} \bar{S} \\ \bar{T}_2 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{\bar{p}\} = \begin{Bmatrix} \bar{p}_1 \\ \bar{p}_2 \\ \bar{p}_3 \end{Bmatrix}. \quad (3.15')$$

Первые два слагаемых соответствуют уравнениям равновесия безмоментной теории оболочек, матрицы $[L1]$ и $[L2]$ равны

$$[L1] = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial}{\partial \alpha} + \frac{\partial B}{AB \partial \alpha}\right) & \left(\frac{\partial A}{AB \partial \beta}\right) & 0 \\ -\left(\frac{\partial A}{AB \partial \beta}\right) & \left(\frac{\partial}{\partial \alpha} + \frac{\partial B}{AB \partial \alpha}\right) & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L2] = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial}{\partial \beta} + \frac{\partial A}{AB \partial \beta}\right) & \left(-\frac{\partial B}{AB \partial \alpha}\right) & 0 \\ \left(\frac{\partial B}{AB \partial \alpha}\right) & \left(\frac{\partial}{\partial \beta} + \frac{\partial A}{AB \partial \beta}\right) & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Остальные члены левой части уравнения отражают влияние изменения геометрии на напряженное состояние.

Усилия основного состояния T_{10} ; T_{20} ; S_0 находятся из системы уравнений равновесия безмоментной теории оболочек:

$$[L1] \{T10\} + [L2] \{T20\} = -\{p_0\}, \quad (3.17)$$

где $\{T10\}$ и $\{T20\}$ — векторы усилий основного состояния, $\{p_0\}$ — вектор составляющих поверхностной нагрузки основного состояния;

$$\{T10\} = \begin{Bmatrix} T_{10} \\ S_0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{T20\} = \begin{Bmatrix} S_0 \\ T_{20} \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{p_0\} = \begin{Bmatrix} p_{10} \\ p_{20} \\ p_{30} \end{Bmatrix}. \quad (3.17')$$

Если правые части уравнений (3.11) — (3.13) представить в виде (3.14), то в матричной форме их можно записать следующим образом:

$$\{\bar{p}\} + [E] \{p_0\},$$

где матрица $[E]$ равна

$$[E] = \begin{bmatrix} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) & \gamma_2 & \vartheta_1 \\ \gamma_1 & (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) & \vartheta_2 \\ -\vartheta_1 & -\vartheta_2 & (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \end{bmatrix}.$$

Подставив вместо вектора $\{p_0\}$ из уравнения (3.17) усилия основного состояния, перенесем эти слагаемые в левую часть уравнения (3.15). Они, как видно, влияют только на третье и четвертое слагаемые левой части. В правой части уравнения останется только вектор дополнительной нагрузки. Матрицы $[L3]$ и $[L4]$ уравнения (3.15) приведены в приложении. Уравнения, связывающие внутренние усилия с компонентами деформации в технической теории, линейны. Для анизотропного упругого тела они имеют вид

$$\{T1\} = [C1] \{\varepsilon1\} + [C2] \{\varepsilon2\} - \{T10\};$$

$$\{T2\} = [C3] \{\varepsilon1\} + [C4] \{\varepsilon2\} - \{T20\}. \quad (3.18)$$

Матрицы упругих констант равны:

$$[C1] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{13} & 0 \\ C_{31} & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [C2] = \begin{bmatrix} C_{13} & C_{12} & 0 \\ C_{33} & C_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C3] = \begin{bmatrix} C_{31} & C_{33} & 0 \\ C_{21} & C_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [C4] = \begin{bmatrix} C_{23} & C_{22} & 0 \\ C_{23} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Каждая составляющая этих матриц включает не только коэффициент упругости, но и дополнительные члены, получаемые в результате линеаризации полных нелинейных зависимостей, в которые входят усилия основного состояния. При малых значениях деформаций усилия основного состояния, как правило, малы по сравнению с характеристиками жесткости материала и в расчетах могут не учитываться.

Приведем варианты граничных условий для края оболочки ($\alpha = \text{const}$) в линеаризованном виде. Вдоль края приложим усилия T_1^0 , S^0 , Q^0 . Считаем, что усилия при деформации оболочки сохраняют свое направление. Разделим усилия на крае. Будем считать, что $T_1^0 = T_{10}^0 + \bar{T}_1^0$; $S^0 = S_0^0 + \bar{S}^0$, где T_{10}^0 и S_0^0 — краевые усилия, соответствующие основному состоянию и уравнениям (3.17), а $\bar{T}_1^0$, $\bar{S}^0$ — дополнительные силы, приложенные к краю. Усилие Q^0 не разделяется. Из соотношений (1.14) следует при $\alpha = \text{const}$:

$$\left. \begin{aligned} u &= u^0 \text{ или } \bar{T}_1 + S_0 \gamma_2 = \bar{T}_1^0; \\ v &= v^0 \text{ или } \bar{S} + T_{10} \gamma_1 = \bar{S}^0; \\ w &= w^0 \text{ или } T_{10} \vartheta_1 + S_0 \vartheta_2 = Q^0. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Кроме того, возможны разные комбинации силовых и геометрических условий. При решении задач этими условиями удобнее оперировать, когда они записаны в матричной форме:

$$\left\{ \begin{aligned} \{u\} &= \{u^0\} \text{ или } [F1] \frac{\partial}{\partial \alpha} \{u\} + [F2] \frac{\partial}{\partial \beta} \{u\} + [F3] \{u\} = \{T^0\}; \\ \{u^0\} &= \{u^0 v^0 w^0\}^T; \quad \{T^0\} = \{\bar{T}_1^0 \bar{S}^0 Q^0\}^T. \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Матрицы $[F1]$, $[F2]$, $[F3]$ приведены в приложении.

Полная система уравнений технической теории мягких оболочек имеет следующий вид:

уравнение равновесия

$$[L1] \{T1\} + [L2] \{T2\} + [L3] \{\varepsilon1\} + [L4] \{\varepsilon2\} = -\{\bar{p}\}; \quad (3.22)$$

геометрические соотношения

$$\{\varepsilon1\} = [B1] \{u\}; \quad \{\varepsilon2\} = [B2] \{u\}; \quad (3.23)$$

физические соотношения

$$\begin{aligned} \{T1\} &= [C1] \{\varepsilon1\} + [C2] \{\varepsilon2\} - \{T10\}; \\ \{T2\} &= [C3] \{\varepsilon1\} + [C4] \{\varepsilon2\} - \{T20\}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

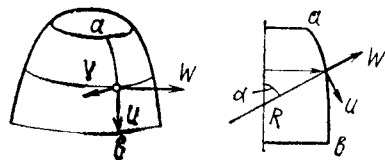


Рис. 4

Полученные уравнения в представленном виде могут быть решены лишь с использованием дискретных методов и ЭЦВМ. В различных частных случаях возможно упрощение приведенной системы.

4. Оболочка вращения. Для оболочки вращения общая система уравнений упрощается. Полагая, что α — угловая координата, определяющая точку на меридиане поверхности вращения, а β — положение самого меридиана (рис. 4), а также имея в виду, что коэффициенты первой квадратичной формы не зависят от β и равны $A=R_1$; $B=r$, матрицы геометрических соотношений и уравнений равновесия можно привести к простому виду (см. приложение). Матрицы упругих констант при этом остаются прежними. Общие соотношения технической теории мягких оболочек приведены в работе [5].

Решение задач для замкнутой по полярной координате оболочки ведется с помощью метода разделения переменных. Все компоненты перемещений, деформаций и усилий, а также составляющие поверхностной и краевой нагрузки представляются в виде суммы произведений двух функций, одна из которых периодическая по β . Перемещения принимаются в следующем виде:

$$u = \sum_{m=0} u_m \cos m\beta; \quad v = \sum_{m=1} v_m \sin m\beta; \quad w = \sum_{m=0} w_m \cos m\beta. \quad (4.1)$$

Номеру $m=0$ соответствует случай осесимметричной деформации оболочки; u_m, v_m, w_m в уравнениях (4.1) являются функциями только α и образуют вектор

$$\{u_m v_m w_m\}^T = \{u\}_m. \quad (4.2)$$

Соответствующие компоненты векторов деформаций и их связь с перемещениями могут быть получены из зависимостей (2.4). Обозначив

$$\{\epsilon_1\}_m = \{\epsilon_{1m} \gamma_{1m} - \phi_{1m}\}^T; \quad \{\epsilon_2\}_m = \{\gamma_{2m} \epsilon_{2m} - \phi_{2m}\}^T, \quad (4.3)$$

получим для каждой гармоники геометрические соотношения

$$\{\epsilon_1\}_m = [B1]_m \{u\}_m; \quad \{\epsilon_2\}_m = [B2]_m \{u\}_m. \quad (4.4)$$

Матрицы $[B1]_m$ и $[B2]_m$ приведены в приложении. Там же даны матрицы уравнений равновесия для случая, когда основное состояние оболочки вращения осесимметрично. Этот случай наиболее важен при решении многих практических задач. Уравнения равновесия сохраняют вид (3.22):

$$[L1]_m \{T1\}_m + [L2]_m \{T2\}_m + [L3]_m \{\epsilon_1\}_m + [L4]_m \{\epsilon_2\}_m = -\{\bar{p}\}_m. \quad (4.5)$$

Здесь векторы $\{T\}_m$ и $\{\bar{p}\}_m$ — амплитудные значения дополнительных усилий и поверхностной нагрузки для каждого значения m .

Представление перемещений в виде (4.1) и аналогичная форма соотношений для усилий и деформаций позволяет рассматривать

двумерную задачу теории оболочек как квазидвумерную. Можно отдельно получить решение для каждого m и затем, суммируя результаты, определить перемещения и усилия в оболочке при самых разных видах несимметричной нагрузки и условиях на граничных контурах.

5. Цилиндрическая оболочка (осесимметричный случай). Для цилиндрической оболочки удастся получить аналитические решения для перемещений и усилий при некоторых видах нагрузки. Здесь наиболее просто можно оценить значения различных составляемых в общей системе уравнений. Эта оценка позволяет распространить решения для цилиндрической оболочки на оболочки более общего вида. Имея в виду, что $R_1 d\alpha = dx$, $1/R_1 = 0$; $\alpha = \pi/2$, $r = R$, из полной системы уравнений приходим к упрощенным зависимостям. Рассмотрим вначале осесимметричный случай. Геометрические зависимости (1.4) принимают вид

$$\epsilon_1 = du/dx; \quad -\phi_1 = dw/dx; \quad \epsilon_2 = w/R. \quad (5.1)$$

Уравнения равновесия основного состояния имеют следующий вид:

$$dT_{10}/dx = -p_{10}; \quad T_{20} = p_{30}R. \quad (5.2)$$

Дополнительному состоянию соответствуют уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{T}_1}{dx} - \frac{dT_{10}}{dx} \epsilon_1 + \frac{T_{20}}{R} \phi_1 + T_{10} \frac{d\epsilon_2}{dx} &= -\bar{p}_1; \\ -\frac{T_2}{R} - T_{10} \frac{d\phi_1}{dx} + T_{20} \frac{\epsilon_2}{R} &= -\bar{p}_3. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Вместе с соотношениями упругости

$$T_{10} + \bar{T}_1 = C_{11}\epsilon_1 + C_{12}\epsilon_2; \quad T_{20} + \bar{T}_2 = C_{21}\epsilon_1 + C_{22}\epsilon_2 \quad (5.4)$$

они составляют полную систему уравнений. Выразим уравнения равновесия через перемещения. Для этого подставим в уравнение (5.3) уравнения (5.1) и (5.4). При малых деформациях ϵ_1 и ϵ_2 $C_{11} \gg T_{10}$, $C_{12} \gg T_{20}$; $C_{22} \gg T_{20}$. Из уравнений (5.3) следует, что результирующие соотношения можно упростить. Получаем следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} C_{11} \frac{d^2 u}{dx^2} + C_{12} \frac{dw}{R dx} &= 0; \\ -T_{10} \frac{d^2 w}{dx^2} + C_{22} \frac{1}{R^2} w + C_{21} \frac{1}{R} \frac{du}{dx} &= pR. \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Уравнения (5.5) показывают, что из всех слагаемых учитываются лишь те, которые содержат дополнительные усилия, а также усилие основного состояния, умноженное на старшую производную от нормального перемещения. Подобные упрощения могут быть использованы и при рассмотрении осесимметричных случаев дефор-

мирования не только цилиндрических оболочек. Однако неучет таких же членов без дополнительного обоснования в других задачах, как будет показано ниже, может привести к ошибочному решению. Исключая из системы (5.5) перемещение u , получим

$$-T_{10} \frac{d^2 w}{dx^2} + \left(C_{22} - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{11}} \right) \frac{1}{R^2} w = p - \frac{C_{21}}{R C_{11}} T_1. \quad (5.6)$$

В правой части уравнения полное осевое усилие в оболочке при $p_1=0$ постоянно по длине. Для изотропной оболочки

$$C_{11} = C_{22} = \frac{Eh}{1-\mu^2}; \quad C_{12} = C_{21} = \mu \frac{Eh}{1-\mu^2},$$

и уравнение (5.6) принимает вид

$$-T_{10} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{Eh}{R^2} w = p - \mu \frac{T_1}{R}. \quad (5.7)$$

Обозначив $Eh/T_{10}R^2 = \lambda_1^2$, получим решение уравнения (5.7):

$$w = \left(\frac{pR^2}{Eh} - \mu \frac{T_1 R}{Eh} \right) + A_1 e^{-\lambda_1 x} + A_2 e^{+\lambda_1 x}, \quad (5.8)$$

которое показывает, что радиальный прогиб вдали от краевой зоны описывается «безмоментным» решением. Длина краевой зоны определяется показателем степени экспоненты λ_1 :

$$l \approx 3/\lambda_1 = 3 \sqrt{T_{10} R^2 / (Eh)}.$$

Она мала по величине, и ее отношение к радиусу оболочки примерно пропорционально корню квадратному из величины продольной деформации. Решение (5.8) позволяет построить деформированную форму и найти усилия в оболочке при различных граничных условиях.

6. Краевой эффект. Приближение типа краевого эффекта широко используется при построении упрощенных решений моментной теории оболочек. Подобные упрощения можно провести при анализе уравнений (4.4), (4.5) мягкой оболочки вращения. Рассмотрим непологий участок оболочки. Будем считать, что размеры краевой зоны невелики, так что кривизны в ее пределах можно считать постоянными. Положим также, что касательные перемещения меньше нормальных и производные от перемещения w больше самого перемещения. Эти предположения позволяют в случае осесимметричной деформации прийти к уравнению краевого эффекта мягкой оболочки [6]:

$$d^2 w_k / d\alpha^2 - \lambda^2 w_k = 0; \quad \lambda^2 = Eh R_1^2 / (T_{10} R_2^2). \quad (6.1)$$

Коэффициент λ^2 считается постоянным. При малых деформациях он представляет собой большую величину. Без учета возрастающих функций решение этого уравнения вблизи края $\alpha = \alpha_0$ имеет вид

$$w_k = C_1 e^{-\lambda(\alpha_0 - \alpha)}. \quad (6.2)$$

Полное нормальное перемещение в оболочке определяется двумя слагаемыми:

$$w = w_0 + C_1 e^{-\lambda(\alpha_0 - \alpha)}, \quad (6.3)$$

где w_0 — нормальное перемещение, соответствующее безмоментной линейной теории.

Угол поворота нормали и окружное усилие имеют также два слагаемых:

$$\vartheta_1 = \vartheta_{10} - C_1 \frac{\lambda}{R_1} e^{-\lambda(\alpha_0 - \alpha)}; \quad T_2 = T_{20} - C_1 \frac{\lambda^2}{R_1^2} R_2 T_{10} e^{-\lambda(\alpha_0 - \alpha)}. \quad (6.4)$$

Меридиональное усилие T_1 и касательное перемещение u в теории краевого эффекта определяются только безмоментным решением. Константа C_1 определяется из условий на границе оболочки.

7. Деформация цилиндрической оболочки при изгибе. При рассмотрении осесимметричного нагружения цилиндрической оболочки было показано, что все члены, содержащие усилия основного состояния, умноженные на линейные и угловые составляющие деформаций, за исключением одного, малы по величине и их можно не учитывать. Исключение относится к слагаемому, соответствующему усилию T_{10} , умноженному на старшую производную от перемещения w . На примере изгиба длинной цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением, покажем, что пренебрежение слагаемыми, не учитываемыми при осесимметричном случае, может привести к ошибочным результатам.

Линеаризованные уравнения равновесия для цилиндрической оболочки при $m=1$ принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}_2 + T_{10} R \frac{d^2 w}{dx^2} &= 0; \\ \frac{d\bar{T}_1}{dx} + \frac{\bar{S}}{R} + T_{10} \frac{1}{R} \left(\frac{dv}{dx} - \frac{dw}{dx} \right) + T_{20} \frac{1}{R} \left(\frac{dw}{dx} - \frac{u}{R} \right) &= 0; \\ \frac{\bar{T}_2}{R} - \frac{dS}{dx} - T_{10} \frac{d^2 v}{dx^2} + T_{20} \frac{du}{R dx} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Продифференцируем второе уравнение по x , умножим на R и сложим с третьим. Вместе с первым уравнением получим систему

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}_2 &= -T_{10} R \frac{d^2 w}{dx^2}; \\ \frac{d^2 \bar{T}_1}{dx^2} - (2T_{10} - T_{20}) \frac{d^2 w}{R dx^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

Эти соотношения получены без каких-либо дополнительных упрощений. Отметим, что все слагаемые здесь имеют примерно один и тот же порядок. Если, например, пренебречь во втором и третьем уравнениях (7.1) слагаемыми, содержащими усилия основного состояния, умноженные на компоненты перемещения и их производные, то вместо второго уравнения (7.2) получим

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} = T_{10} \frac{d^2 w}{R dx^2} \quad (7.3)$$

Использование в дальнейшем этого соотношения приводит к ошибочным результатам.

Для получения решения далее необходимо воспользоваться геометрическими и физическими соотношениями. Для изотропной оболочки при $T_{10} \ll Eh$; $T_{20} \ll Eh$ разрешающее уравнение принимает вид

$$\frac{d^6 w}{dx^6} - \frac{EhR^2}{T_{10}} \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{2T_{10} - T_{20}}{T_{10}} \frac{d^2 w}{dx^2} = 0. \quad (7.4)$$

Решение этого уравнения в случае ($2T_{10} \neq T_{20}$) состоит из четырех частных решений, соответствующих задаче для балки, и двух — краевому эффекту. Таким образом, мягкая оболочка, нагруженная равномерным давлением и изгибающим моментом, приложенным к торцевым сечениям, деформируется как балка. К балочному решению при определении деформированной формы оболочки необходимо добавить решение краевого эффекта с показателем изменчивости таким же, как и при осесимметричной деформации. Равномерное давление не создает изгибающего момента относительно центра сечения. Этот достаточно очевидный вывод, полученный из полных без упрощений линеаризованных уравнений, следует и из закона Паскаля.

Приведенный пример показывает, что при составлении уравнений нужно весьма осторожно прибегать к упрощениям, особенно когда деформированное состояние описывается не быстро изменяющимися функциями. Это относится не только к цилиндрической оболочке, но и к оболочкам других конфигураций.

8. Несимметричная деформация цилиндрической мягкой оболочки. В случае нагружения оболочки усилиями, изменчивость которых вдоль окружности значительна, деформированное состояние хорошо описывается приближенной теорией. К упрощениям, которые принимают при линеаризации уравнений, добавляют предположения, используемые в известной полубезмоментной теории цилиндрической оболочки. Имеются в виду равенство нулю числа Пуассона и зависимости

$$\epsilon_2 = \partial v / R \partial \beta + w / R = 0; \quad \gamma = \partial u / R \partial \beta + \partial v / \partial x = 0. \quad (8.1)$$

Исключая отсюда перемещение v и используя соотношение между осевым усилием и перемещением $T_1 = Eh \partial u / \partial x$, получаем уравнения совместности деформаций

$$Eh \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}_1}{R \partial \beta^2} = 0. \quad (8.2)$$

В уравнениях равновесия оставляют лишь дополнительные усилия и наибольшее по величине слагаемое при большой изменчивости функций по β . Заметим, что такого же типа слагаемое учтено при

построении теории краевого эффекта, но со старшей производной по x :

$$\left. \begin{aligned} \partial \bar{T}_1 / \partial x + \partial \bar{S} / (R \partial \beta) &= -\bar{p}_1; \quad \partial \bar{S} / \partial x + \partial \bar{T}_2 / (R \partial \beta) = -\bar{p}_2; \\ -\frac{1}{R} \bar{T}_2 + \frac{\bar{T}_{20}}{R} \frac{\partial \theta_2}{\partial \beta} &= -\bar{p}_3. \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

Таким образом, для определенного вида нагрузок принимают свои упрощения, но в каждом случае должны быть учтены наиболее существенные члены, соответствующие наибольшей изменчивости функций. Система (8.3) эквивалентна одному уравнению, связывающему осевое усилие с нормальным перемещением:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_1}{\partial x^2} + \frac{T_{20}}{R^4} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \beta^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} \right) = -\frac{\partial \bar{p}_1}{\partial x} + \frac{\partial \bar{p}_2}{R \partial \beta} + \frac{\partial^2 \bar{p}_3}{R \partial \beta^2}. \quad (8.4)$$

Соотношения (8.2) и (8.4) позволяют прийти к одному разрешающему уравнению

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{p_0 R}{Eh} \frac{1}{R^4} \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} + w \right) = -\frac{1}{EhR^2} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left[\frac{\partial^2 \bar{p}_3}{\partial \beta^2} + \frac{\partial \bar{p}_2}{\partial \beta} - R \frac{\partial \bar{p}_1}{\partial x} \right]. \quad (8.5)$$

Положим, что на оболочку действует только нормальная составляющая нагрузки. Представим ее, так же как и нормальное перемещение, в виде рядов

$$\bar{p}_3 = \sum_{m=2} p_m \cos m\beta; \quad w = \sum_{m=2} w_m \cos m\beta. \quad (8.6)$$

Для каждого m -ного члена ряда получаем обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^4 w_m}{dx^4} + \frac{p_0 R}{Eh} \frac{1}{R^4} m^4 (m^2 - 1) w_m = -\frac{m^4}{EhR^2} p_m. \quad (8.7)$$

Случай $m=1$ соответствует известному решению для балки с неизменяемым контуром поперечного сечения. Для $m=2, 3, 4 \dots$ общий интеграл (8.7) имеет вид

$$\begin{aligned} w_m = & -\frac{p_m}{p_0} \frac{R}{m^2 - 1} + C_{1m} \operatorname{sh} k_m x \sin k_m x + C_{2m} \operatorname{sh} k_m x \cos k_m x + \\ & + C_{3m} \operatorname{ch} k_m x \sin k_m x + C_{4m} \operatorname{ch} k_m x \cos k_m x. \end{aligned} \quad (8.8)$$

Коэффициент k_m здесь равен

$$k_m = \left[\frac{p_0 R}{4Eh} \frac{1}{R^4} m^4 (m^2 - 1) \right]^{\frac{1}{4}}.$$

Константы $C_{1m} - C_{4m}$ в уравнении (8.8) определяются из граничных условий на торцах оболочки.

Рассмотрим пример расчета цилиндра, нагруженного внутренним давлением и радиальной силой q , распределенной вдоль образующей. Оболочка имеет на торцах диафрагмы, жесткие в плоскости поперечного сечения. Осевые усилия на торцах равны T_{10} . Разложив нагрузку в ряд, получим

$$p = \left(p_0 - \frac{q}{2\pi R} \right) - \frac{q}{\pi R} \sum_{m=1}^{\infty} \cos m\beta.$$

К нагрузке основного состояния отнесем слагаемое в круглых скобках. Если поместить начало отсчета по x посередине оболочки, то в решении (8.8) можно оставить лишь четные функции. Из условий $x=l$, $w=0$ и $w''=0$ (второе условие следует из того, что на торце дополнительное усилие равно нулю) определим константы C_{1m} , C_{4m} и нормальное перемещение w_m .

Перемещение w_m при $x=0$ равно

$$w_m = \frac{q}{\rho_0 \pi m^2 - 1} \left[1 - \frac{\cos k_m l \operatorname{ch} k_m l}{\operatorname{sh}^2 k_m l + \cos^2 k_m l} \right].$$

При определении полного перемещения w необходимо учесть составляющую перемещения, соответствующую первой гармонике:

$$w = w_1 \cos \beta + \sum_{m=2}^{\infty} w_m \cos m\beta.$$

Остальные компоненты перемещений и усилий могут быть найдены из соотношений (8.1) — (8.3).

Приближенная теория цилиндрической оболочки построена в работе [8]. Она позволяет получить замкнутые решения широкого круга задач и провести оценку перемещений и усилий в оболочках при самых разных видах несимметричной нагрузки.

9. Разностные схемы решения задач. Расчет конструкций, имеющих сложную конфигурацию и граничные условия, проводится дискретными методами. Одним из наиболее эффективных дискретных методов является метод конечных разностей (МКР). Он был использован применительно к расчету мягких оболочек в работе [7].

Система дифференциальных уравнений мягкой оболочки в перемещениях имеет следующий вид:

$$[A1] \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \{u\} + [A2] \frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \beta} \{u\} + [A3] \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \{u\} + [A4] \frac{\partial}{\partial \alpha} \{u\} + [A5] \frac{\partial}{\partial \beta} \{u\} + [A6] \{u\} = \{p\}. \quad (9.1)$$

Матрицы $[A1] \dots [A6]$ имеют размер 3×3 . Компоненты этих матриц получаются из соотношений (3.22) — (3.24). В правой части — вектор полной поверхности нагрузки.

Уравнение (9.1) в частных производных имеет второй порядок по каждой координате. Разностная форма записи первой и второй производных по β с точностью $O(h^4)$ имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \beta} \{u\} &= \frac{-\{u\}_{i+2} + 8\{u\}_{i+1} - 8\{u\}_i + \{u\}_{i-1}}{12h_\beta} + O(h_\beta^4); \\ \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \{u\} &= \frac{-\{u\}_{i+2} + 16\{u\}_{i+1} - 30\{u\}_i + 16\{u\}_{i-1} - \{u\}_{i-2}}{12h_\beta^2} + O(h_\beta^4). \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

Область интегрирования, границы которой совпадают с линиями кривизны, разбивается на N участков в направлении β и M участков в направлении α . Искомой оказывается система полных векторов функций $\{\bar{u}\}$, взятых в M точках направления α . Решение отыскивается по слоям в направлении α , при этом каждый слой есть дискретный разностный аналог исходной записи производных в направлении β ($\alpha = \text{const}$). В приложении приведены таблицы, которые позволяют просто перейти от дифференциального уравнения к его конечно-разностному аналогу. В результате получается следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[B1] \frac{d^2}{d\alpha^2} \{\bar{u}\} + [B2] \frac{d}{d\alpha} \{\bar{u}\} + [B3] \{\bar{u}\} = \{p1\}. \quad (9.3)$$

Компоненты матрицы $[B1]$, $[B2]$, $[B3]$ вычисляются по формулам, приведенным в приложении. Размер матриц определяется числом участков в направлении β . Индекс j соответствует номеру точки на слое $\alpha = \text{const}$ ($j=0, 1, 2, \dots$).

Структура матриц $[B2]$ и $[B3]$ зависит от принятой разностной аппроксимации производных на слое. Для пятиточечной аппроксимации (9.2) это блочные пятидиагональные матрицы, каждый блок которых имеет размер 3×3 . Матрица $[B1]$ имеет блочную диагональную структуру, которая не зависит от аппроксимации производных на слое. Регулярность структуры матриц $[B1]$, $[B2]$, $[B3]$ нарушается вблизи границы области, где необходимо ввести граничные условия. Для слоя $\alpha = \text{const}$ граничные условия имеют вид (3.21).

Чтобы не выходить за пределы области интегрирования, можно записывать первую производную в левых для правого края и в правых для левого разностях через шесть слоев, сохраняя точность аппроксимации $O(h^4)$. Уравнения равновесия во втором и предпоследнем слоях необходимо записывать в конечных разностях со сдвигом на один слой влево и вправо для того, чтобы не выйти за пределы области интегрирования.

10. Применение метода матричной прогонки. Решение системы дифференциальных уравнений (9.3) будет проводиться численно в конечных разностях методом факторизации разностного матричного уравнения. Система уравнений (9.3) в центральных разностях может быть представлена в виде

$$[D1]_i \{\bar{u}\}_{i-1} + [D2]_i \{\bar{u}\}_i + [D3]_i \{u\}_{i+1} = \{p1\}_i. \quad (10.1)$$

Здесь $[D1]$, $[D2]$, $[D3]$ — матрицы коэффициентов размером $3N \times 3N$, векторы $\{\bar{u}\}$ и $\{p1\}$ имеют размер $3N$.

Компоненты матриц $[D1]$, $[D2]$, $[D3]$ определяются формулами

$$[D1]_{ij} = \frac{1}{h_\alpha^2} [B1]_{ij} - \frac{1}{2h_\alpha} [B2]_{ij}; \quad [D2]_{ij} = [B3]_{ij} - \frac{2}{h_\alpha^2} [B1]_{ij};$$

$$[D3]_{ij} = \frac{1}{h_\alpha^2} [B1]_{ij} + \frac{1}{2h_\alpha} [B2]_{ij},$$

где h_α — шаг интегрирования в направлении α .

Решение трехточечного матричного уравнения (10.1) принимается в виде

$$\{\bar{u}\}_i = \{L\}_i + [E]_i \{\bar{u}\}_{i+1}, \quad (10.2)$$

где $\{L\}_i$, $[E]_i$ — вектор и матрица коэффициентов, которые определяются следующими рекуррентными формулами:

$$\{L\}_i = [G]_{i-1}^{-1} \{p\}_{i-1}; \quad [E]_i = -[G]_{i-1}^{-1} [D3]_i. \quad (10.3)$$

Матрица $[G]_{i-1}$ и вектор $\{p\}_{i-1}$ выражаются следующим образом:

$$[G]_{i-1} = [D1]_i [E]_{i-1} + [D2]_i; \quad \{p\}_{i-1} = \{p\}_i - [D1]_i \{L\}_{i-1}. \quad (10.4)$$

Расчет по методу прогонки ведется в два этапа. Первый соответствует определению прогоночных матриц $[E]$ и вектора $\{L\}$ при прямом ходе (движение от левой границы интегрирования вправо). Второй этап — обратный ход, при котором определяются полные векторы искомых функций $\{\bar{u}\}$ на каждом слое по формуле (10.2).

Решение проводится с учетом условий на каждой границе. В общем случае возможны кинематические, силовые или смешанные граничные условия. Представив их через перемещения и производные, можно эти условия записать следующим образом:

$$[H1]\{\bar{u}\}_i + [H2]\{\bar{u}\}_{i+1} + [H3]\{\bar{u}\}_{i+2} = \{T\}_i. \quad (10.5)$$

Чтобы не выйти за пределы области интегрирования, первая производная здесь представлена в односторонних разностях с точностью $O(h^2)$:

$$\frac{d}{d\alpha} \{\bar{u}\} = \frac{-3\{\bar{u}\}_i + 4\{\bar{u}\}_{i+1} - \{\bar{u}\}_{i+2}}{2h_\alpha}.$$

На левом крае ($i=0$) связь между векторами в соседних слоях представляется следующим образом:

$$\{\bar{u}\}_0 = \{L\}_0 + [E]_0 \{\bar{u}\}_1. \quad (10.6)$$

Чтобы привести уравнение (10.5) к виду (10.6), используется система уравнений равновесия (10.1). При совместном решении (10.5) и (10.1) получается

$$\{\bar{u}\}_1 = [G1]^{-1} \{\bar{p}1\}_2 - [G1]^{-1} [G2] \{\bar{u}\}_2, \quad (10.7)$$

где матрицы $[G1]$ и $[G2]$ имеют следующие значения:

$$[G1] = [D3]_2^{-1} [D1]_2 - [H3]^{-1} [H1]; \quad [G2] = [D3]_2^{-1} [D2]_2 - [H3]^{-1} [H2].$$

Вектор $\{\bar{p}1\}_2$ равен:

$$\{\bar{p}1\}_2 = [D3]_2^{-1} \{p1\}.$$

Из сопоставления (10.6) и (10.7) получаются формулы для прогоночной матрицы и вектора в начале интервала интегрирования:

$$[E]_1 = -[G1]^{-1} [G2]; \quad \{L\}_1 = [G1]^{-1} \{p1\}. \quad (10.8)$$

В конце интервала на правом крае $i=M$ уравнение (10.5) имеет вид

$$[H1]\{\bar{u}\}_{M-2} + [H2]\{\bar{u}\}_{M-1} + [H3]\{\bar{u}\}_M = \{T\}_M.$$

Учитывая рекуррентные формулы (10.2), которые для $i=M-2$, $i=M-1$ записываются в форме

$$\{\bar{u}\}_{M-2} = \{L\}_{M-2} + [E]_{M-2} \{\bar{u}\}_{M-1};$$

$$\{\bar{u}\}_{M-1} = \{L\}_{M-1} + [E]_{M-1} \{\bar{u}\}_M,$$

можно исключить из последних трех уравнений векторы $\{\bar{u}\}_{M-2}$, $\{\bar{u}\}_{M-1}$. В результате искомый вектор на правом крае равен

$$\{\bar{u}\}_M = [G4]^{-1} \{p2\},$$

где

$$[G3] = [H1][E]_{M-2} + [H2]; \quad [G4] = [G3][E]_{M-1} + [H3];$$

$$\{p2\} = \{T\}_M - [H1]\{L\}_{M-2} - [G3]\{L\}_{M-1}.$$

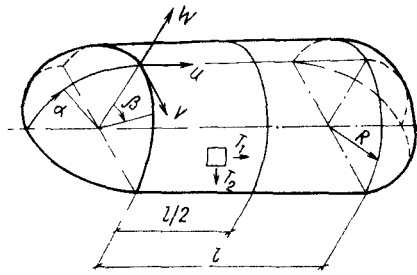
Существенным недостатком данного решения является то, что при расчете необходимо помнить прогоночные матрицы и векторы для каждого слоя, а это требует большого числа обращений к внешним запоминающим устройствам ЭВМ. Избежать этого можно, используя процедуру встречной прогонки, которая позволяет получить решение линейаризованной системы уравнений значительно проще. Суть метода встречной прогонки состоит в том, что прогоночные матрицы и векторы определяются при движении в одном направлении, но запоминаются они лишь в тех сечениях, где необходимо иметь векторы искомых функций, которые определяются при движении в обратном направлении. Так же, как и в случае простой прогонки, решение ищется в виде

$$\{\bar{u}\}_i = \{L_\pi\}_i + [E_\pi] \{\bar{u}\}_{i+1}; \quad (\text{слева})$$

$$\{\bar{u}\}_{i+1} = \{L_\pi\}_{i+1} + [E_\pi] \{\bar{u}\}_i. \quad (\text{справа})$$

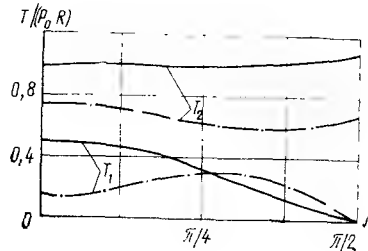
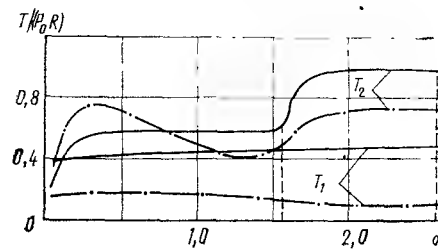
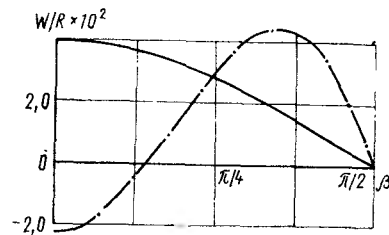
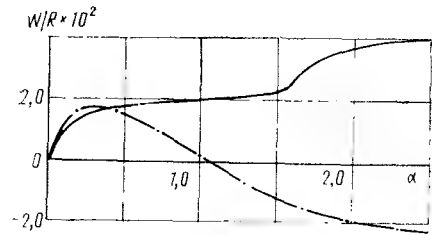
Расчет при движении в одном, а затем в другом направлении начинается с определения прогоночных матриц и векторов из граничных условий на каждом крае. Совместное решение последних двух уравнений позволяет определить искомый вектор $\{\bar{u}\}$ в каждом сечении.

11. Расчет оболочки пневматического свода. С помощью метода конечных разностей проведен расчет полуцилиндрической оболочки с торцами в виде четвертой сферы (рис. 5). Оболочка закреплена по опорному контуру и нагружена внутренним давлением p_0 и распределенной дополнительной составляющей внешнего усилия. Закон распределенного усилия принимался в виде $p = -0,5p_0 \cos \beta$. В связи с тем, что и нагрузка, и рассматриваемая конструкция симметричны, расчет проводился для части оболочки, ограниченной плоскостями симметрии. Геометрические и физические параметры оболочки следующие: $R=10$ м; $l=20$ м; $p_0=500$ Па; $Eh=2000$ Н/м. При дискретизации на поверхности оболочки на-



5	6	7
6	7	8
8	9	

Рис. 5
Рис. 6
Рис. 7
Рис. 8
Рис. 9



носились сетка, состоящая в окружном направлении из 15 участков, в меридиональном — из 41 участка для сферической оболочки и 26 для цилиндрической.

На рис. 6 и 7 приведены графики перемещений оболочки в двух плоскостях симметрии — меридиональной и для поперечного сечения оболочки (сплошная линия — перемещения от внутреннего давления, штрихпунктирная — от распределенной поверхностной нагрузки).

На рис. 8 и 9 представлены графики усилий T_1 и T_2 . Ясно видна переходная зона вблизи стыка цилиндрической и сферической оболочек. Вдали от этой зоны усилия, как видно из графиков, описываются плавно меняющимися функциями.

12. Метод конечных элементов. С помощью метода конечных элементов (МКЭ) могут быть решены самые разные задачи статики и динамики мягких оболочек. Он оказывается одним из наиболее удобных методов расчета сложных конструкций. Достоинства метода заключаются в его универсальности, возможности использования элементов различных типов, произвольности рассматриваемой области, простоте приемов построения элементов высокой точности. Один из важных этапов расчета конструкций по МКЭ — по-

строение матрицы жесткости элементов. Рассмотрим общую процедуру получения матрицы жесткости для элемента мягкой оболочки.

Воспользуемся условиями равновесия технической теории мягких оболочек в форме принципа возможных перемещений. Основному состоянию соответствует уравнение (3.9), которое в матричной форме имеет вид

$$\iint (\{\delta \epsilon_1\}^T \{T_{10}\} + \{\delta \epsilon_2\}^T \{T_{20}\}) AB d\alpha d\beta = \iint \{\delta u\}^T \{f_0\} AB d\alpha d\beta. \quad (12.1)$$

Здесь векторы деформаций, усилий основного состояния, внешней нагрузки и перемещений приняты в форме (1.3), (3.17), (3.2), (1.1).

Дополнительное состояние определяется матричным уравнением

$$\begin{aligned} \iint (\{\delta \epsilon_1\}^T + \{\bar{T}_1\}^T + \{\delta \epsilon_2\}^T \{\bar{T}_2\}^T + T_{10} \{\delta \epsilon_1\}^T \{\epsilon_1\} + T_{20} \{\delta \epsilon_2\}^T \{\epsilon_2\} + \\ + S_0 \{\delta \epsilon_1\}^T \{\epsilon_2\} + S_0 \{\delta \epsilon_2\}^T \{\epsilon_1\}) AB d\alpha d\beta = \\ = \iint (\{\delta u\}^T \{\bar{f}\} + \{\epsilon_1 + \epsilon_2\} \{\delta u\}^T \{f_0\}) AB d\alpha d\beta. \end{aligned} \quad (12.2)$$

Первые два слагаемых в левой части уравнений соответствуют работе дополнительных усилий на возможных обобщенных перемещениях. Если вместо векторов $\{\bar{T}_1\}$ и $\{\bar{T}_2\}$ представить их выражения через соотношения упругости (3.18) и (3.19), а также воспользоваться геометрическими зависимостями (1.4), то уравнение (12.2) через перемещения записывается в виде

$$\begin{aligned} \iint (\{\delta u\}^T [B_1]^T [C_1] [B_1] \{u\} + \{\delta u\}^T [B_1]^T [C_2] [B_2] \{u\} + \\ + \{\delta u\}^T [B_2]^T [C_3] [B_1] \{u\} + \{\delta u\}^T [B_2]^T [C_4] [B_2] \{u\} + \\ + \{\delta u\}^T [B_1]^T T_{10} [B_1] \{u\} + \{\delta u\}^T [B_2]^T T_{20} [B_2] \{u\} + \{\delta u\}^T [B_1]^T S_0 [B_2] \{u\} + \\ + \{\delta u\}^T [B_2]^T S_0 [B_1] \{u\}) AB d\alpha d\beta = \iint \{\delta u\}^T \{f\} AB d\alpha d\beta. \end{aligned} \quad (12.3)$$

В правой части уравнения — вектор полных усилий. Он получен в результате перенесения из левой части слагаемых, соответствующих уравнению (12.1), и суммирования векторов нагрузки основного и дополнительного состояний.

Положим, что поле перемещений в элементе определяется соотношением

$$\{u\} = [\Phi] \{u_n\}, \quad (12.4)$$

где матрица $[\Phi]$ — система полиномов в функции координат α, β ; вектор $\{u_n\}$ определяет число степеней свободы элемента или число узловых перемещений.

От размера этого вектора зависит точность конечного элемента, а также возможность более правильного удовлетворения граничным условиям. Отметим, что узловыми перемещениями могут быть как сами перемещения, так и углы поворота. Это не является противоречием для мягкой оболочки. Условным углом поворота в энергетических соотношениях соответствуют фиктивные узловые изгибающие моменты, которые просто выражаются через поверхностные составляющие нагрузок. Введение в вектор узловых перемещений углов поворота позволяет расширить возможности метода конечных элементов.

Подставим соотношение (12.4) в уравнение (12.3). Введя обозначения

$$[R1] = [B1][\Phi] \text{ и } [R2] = [B2][\Phi], \quad (12.5)$$

из уравнения (12.3) получим соотношение для матрицы жесткости конечного элемента мягкой оболочки:

$$[K] = \iint ([R1]^T [D1][R1] + [R1]^T [D2][R2] + [R2]^T [D3][R1] + [R2]^T [D4][R2]) AB d\alpha d\beta. \quad (12.6)$$

Матрицы $[D1]$ — $[D4]$ имеют следующий вид:

$$[D1] = \begin{bmatrix} C_{11} + T_{10} & C_{13} & 0 \\ C_{31} & C_{33} + T_{10} & 0 \\ 0 & 0 & T_{10} \end{bmatrix}; \quad [D2] = \begin{bmatrix} C_{13} + S_0 & C_{12} & 0 \\ C_{33} & C_{32} + S_0 & 0 \\ 0 & 0 & S_0 \end{bmatrix};$$

$$[D3] = \begin{bmatrix} C_{31} + S_0 & C_{33} & 0 \\ C_{21} & C_{23} + S_0 & 0 \\ 0 & 0 & S_0 \end{bmatrix}; \quad [D4] = \begin{bmatrix} C_{33} + T_{20} & C_{32} & 0 \\ C_{23} & C_{22} + T_{20} & 0 \\ 0 & 0 & T_{20} \end{bmatrix}. \quad (12.7)$$

В этих матрицах коэффициенты жесткости, как правило, значительно больше величин усилий основного состояния. Поэтому в тех элементах матрицы, где коэффициенты суммируются с основными усилиями, последние могут не учитываться.

Из соотношений (12.3) и (12.4) можно получить также вектор узловых усилий

$$\{p_n\} = \iint [\Phi]^T \{f\} AB d\alpha d\beta. \quad (12.8)$$

Окончательное уравнение, связывающее узловые усилия и узловые перемещения конечного элемента мягкой оболочки, может быть представлено в виде

$$[K]\{u_n\} = \{p_n\}. \quad (12.9)$$

В уравнениях (12.6) и (12.8) интегрирование ведется по недеформированной поверхности элемента. Элементы могут иметь самую разную геометрию. Матрица $[K]$ квадратная: число составляющих в строке, так же как и в столбце, соответствует числу степеней свободы элемента.

На рис. 10—12 представлены три вида одномерного конечного элемента; первый имеет две узловые точки и по два узловых перемещения в каждой точке, второй — промежуточную узловую точку посередине элемента; всего в элементе шесть степеней свободы, в каждой из двух узловых точек третьего элемента — три степени свободы. Построим матрицы жесткости и векторы узловых сил для каждого элемента.

Положим, что поле перемещения для случая, указанного на рис. 10, аппроксимируется следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 \\ \beta_0 & \beta_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \end{Bmatrix}. \quad (12.10)$$

Введя вектор узловых перемещений в соответствии с рис. 10

$$\{u_n\} = \{u_1 \ w_1 \ u_2 \ w_2\}^T,$$

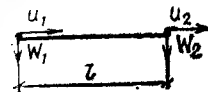


Рис. 10

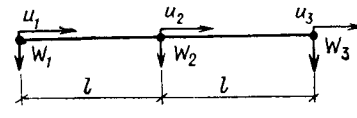


Рис. 11

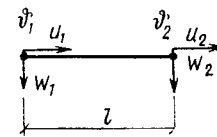


Рис. 12

определим составляющие $\alpha_0 \dots \beta_1$ матрицы (12.10). Они выражаются через узловые перемещения. Тогда вектор $\{u\}$ можно представить в виде $\{u\} = [\Phi]\{u_n\}$, где матрица $[\Phi]$ равна

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} (1-x/l) & 0 & x/l & 0 \\ 0 & (1-x/l) & 0 & x/l \end{bmatrix}. \quad (12.11)$$

С помощью соотношения (12.5) определим составляющие матрицы, а из (12.6) — матрицу жесткости элемента:

$$[K]_1 = \int_0^l \frac{1}{l^2} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ +1 & 0 \\ 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & T_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} dx. \quad (12.12)$$

В последней зависимости из (12.6) оставлено только первое слагаемое, так как остальные члены соответствуют двумерной задаче. В матрице $[D1]$ отсутствует вторая строка и второй столбец, а также принято, что $T_{10} \ll C_{11}$. Окончательное соотношение для матрицы жесткости элемента (12.10) получается после перемножения матриц в выражении (12.12):

$$[K]_1 = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & -C_{11} & 0 \\ T_{10} & 0 & -T_{10} & 0 \\ 0 & C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{10} \end{bmatrix}. \quad (12.13)$$

Вектор узловых сил получается из соотношения (12.8). Касательная q_1 и нормальная q_3 составляющие нагрузки образуют вектор $\{f\} = \{q_1 q_3\}^T$.

Подставив в уравнение (12.8) выражение для матрицы $[\Phi]$ (12.11), получим при постоянных усилиях в пределах элемента вектор узловых сил

$$\{p_n\} = \int_0^l \begin{bmatrix} (1-x/l) & 0 \\ 0 & (1-x/l) \\ x/l & 0 \\ 0 & x/l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_3 \end{Bmatrix} dx = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} q_1 l \\ q_3 l \\ q_1 l \\ q_3 l \end{Bmatrix}. \quad (12.14)$$

Матрица жесткости для элемента с тремя узловыми точками (см. рис. 11) строится в той же последовательности. Перемещения u и w в элементе принимаются в форме

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 \\ \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{Bmatrix}. \quad (12.15)$$

Коэффициенты матрицы выражаются через узловые перемещения $u_1, w_1, u_2, w_2, u_3, w_3$ и позволяют определить матрицу $[\Phi]$:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{x}{l} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2}\right) & 0 & \left(2 \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2}\right) \\ 0 & \left(1 - \frac{3}{2} \frac{x}{l} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2}\right) & 0 \\ 0 & \left(-\frac{1}{2} \frac{x}{l} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2}\right) & 0 \\ \left(2 \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2}\right) & 0 & \left(-\frac{1}{2} \frac{x}{l} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2}\right) \end{bmatrix}. \quad (12.16)$$

Учитывая соотношения (12.6) и (12.8), получим матрицу жесткости

$$[K]_2 = \frac{1}{12l} \begin{bmatrix} 13C_{11} & 0 & -22C_{11} & 0 & C_{11} & 0 \\ & 13T_{10} & 0 & -22T_{10} & 0 & T_{10} \\ & & 16C_{11} & 0 & -2C_{11} & 0 \\ & & & 16T_{10} & 0 & -2T_{10} \\ & & & & C_{11} & 0 \\ & & & & & T_{10} \end{bmatrix} \quad (12.17)$$

и вектор узловых сил

$$\{p_n\} = \frac{1}{12} \{5q_1 l \quad 5q_3 l \quad 8q_1 l \quad 8q_3 l - q_1 l - q_3 l\}^T.$$

В этом элементе более точно аппроксимируются перемещения. Поле перемещений соответствует уже не ломаным линейным зависимостям, а параболическим кривым.

Элемент третьего вида (см. рис. 12) имеет две узловые точки, в каждой из которых задаются не только перемещения u и w , но и угол поворота ϕ . Таким образом, вектор узловых перемещений имеет вид $\{u_n\} = \{u_1 w_1 \phi_1 u_2 w_2 \phi_2\}^T$.

Поле перемещений принимается в форме

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & 0 & 0 \\ \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{Bmatrix}. \quad (12.18)$$

Матрица, связывающая перемещения с узловыми перемещениями, имеет следующий вид:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{x}{l}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - 3 \frac{x^2}{l^2} + 2 \frac{x^3}{l^3}\right) & \left(-x + 2 \frac{x^2}{l} - \frac{x^3}{l^2}\right) \\ \frac{x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \left(3 \frac{x^2}{l^2} - 2 \frac{x^3}{l^3}\right) & \left(\frac{x^2}{l} - \frac{x^3}{l^2}\right) \end{bmatrix}. \quad (12.19)$$

Здесь учитывается связь между перемещением w и углом поворота ϕ :

$$\phi = -dw/dx.$$

Подстановка зависимости (12.19) в уравнения (12.6) и (12.8) позволяет определить матрицу жесткости элемента

$$[K]_3 = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & C_{11} & 0 & 0 \\ & 6T_{10} & -\frac{1}{10} T_{10} l & 0 & -6T_{10} & -\frac{1}{10} T_{10} l^2 \\ & & \frac{2}{15} T_{10} l^2 & 0 & \frac{1}{10} T_{10} l & -\frac{1}{30} T_{10} l^2 \\ & & & C_{11} & 0 & 0 \\ & & & & 6T_{10} & \frac{1}{10} T_{10} l \\ & & & & & \frac{2}{15} T_{10} l^2 \end{bmatrix} \quad (12.20)$$

и вектор узловых сил при равномерно распределенной нагрузке

$$\{p_n\}_3 = \left\{ q_1 \frac{l}{2} \quad q_3 \frac{l}{2} \quad -\frac{q_3 l^2}{12} \quad q_1 \frac{l}{2} \quad q_3 \frac{l}{2} \quad \frac{q_3 l^2}{12} \right\}^T. \quad (12.21)$$

С помощью этого элемента (см. рис. 12) удастся состыковать соседние элементы по углу поворота непосредственно в узловой точке, что является большим преимуществом, так как более удобно составляется глобальная матрица жесткости и удовлетворяются граничные условия.

Каждый из рассмотренных одномерных конечных элементов имеет свои особенности. Они отличаются точностью, размером матриц жесткости, требованиями, предъявляемыми к ним при составлении глобальной матрицы. Здесь приведены прежде всего методические основы построения элементов. Для многих задач, в которых применяется теория мягких оболочек, необходимо использовать более сложные двумерные элементы. При этом возникают проблемы аппроксимации исходной поверхности, описания криволинейных элементов, нахождения интегралов при определении коэффициентов матрицы, решения сложной системы уравнений и многие другие. Но общая последовательность построения элементов, которая приведена выше, остается той же. Общее соотношение между узловыми перемещениями и узловыми силами имеет такой же вид, что и уравнение (12.9), но размер матрицы жесткости соответствует общему числу степеней свободы рассматриваемой оболочки. Введение в полученную систему уравнений граничных условий, записанных относительно перемещений и их производных, и решение полученных уравнений позволяет определить неизвестные узловые перемещения. По соотношениям (12.4), (1.4), (3.18) находят поле перемещений, деформаций и усилий в оболочке.

13. Расчет сферической оболочки при несимметричной нагрузке методом конечных элементов. Приведем решение задачи опреде-

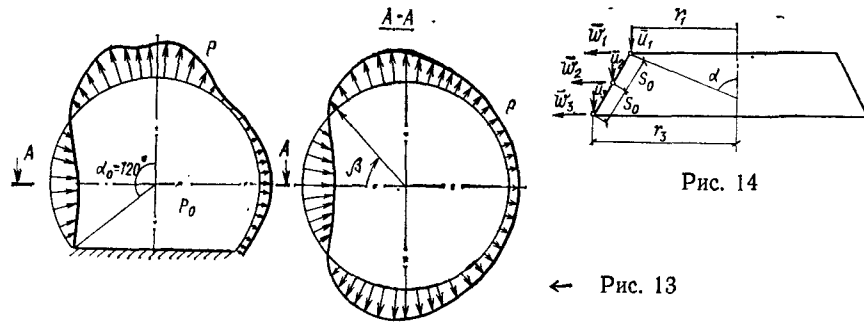


Рис. 14

← Рис. 13

ления деформированного состояния сферической оболочки, нагруженной внутренним давлением и ветровой нагрузкой [9] (рис. 13). Суммарное давление в каждой точке поверхности таково, что зон складок в оболочке не возникает. В качестве конечного элемента принят усеченный конус (рис. 14) с девятью степенями свободы. Наиболее удобно в этой задаче применять перемещения $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$, которые связаны с перемещениями u, v, w соотношением

$$\begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}.$$

Перемещения в элементе аппроксимируются системой функций

$$\bar{u} = \sum_{m=0} u_m(s) \cos m\beta; \quad \bar{v} = \sum_{m=1} v_m(s) \sin m\beta; \quad \bar{w} = \sum_{m=0} w_m(s) \cos m\beta,$$

где $u_m(s)$, $v_m(s)$ и $w_m(s)$ — квадратичные функции дуги меридиана;

$$\begin{pmatrix} u_m(s) \\ v_m(s) \\ w_m(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 \\ A_7 & A_8 & A_9 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{pmatrix}.$$

Составляющие матрицы A_1 — A_9 выражаются через узловые перемещения, что позволяет построить матрицу $[\Phi]$. Из соотношения (12.5) определяются матрицы $[R1]$, $[R2]$ — основные элементы матрицы жесткости (12.6). На рис. 15 и 16 по результатам работы [10] представлены графики расчета оболочки при 43 конечных элементах и значениях констант

$$C_{11} = 42,4 \rho_0 R; \quad C_{12} = 5,5 \rho_0 R; \quad C_{21} = 5,5 \rho_0 R; \\ C_{22} = 24,5 \rho_0 R; \quad C_{33} = 12,2 \rho_0 R.$$

Приведены кривые перемещений и усилий в оболочке при $m=0$ (осесимметричный случай), $m=1$ и $m=2$. Расчеты показывают, что при больших m величины перемещений и усилий незначительны и их можно не принимать во внимание.

14. Заключение. Техническая теория мягких оболочек имеет большие возможности получения практически важных и одновременно достаточно достоверных результатов определения напряжен-

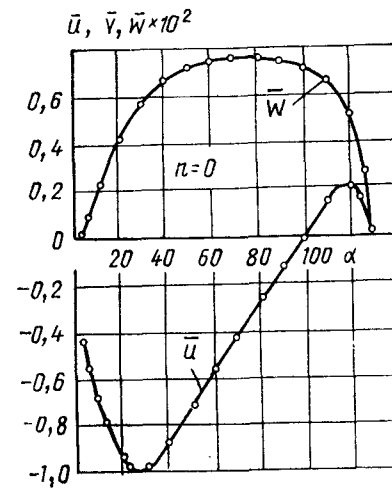


Рис. 15

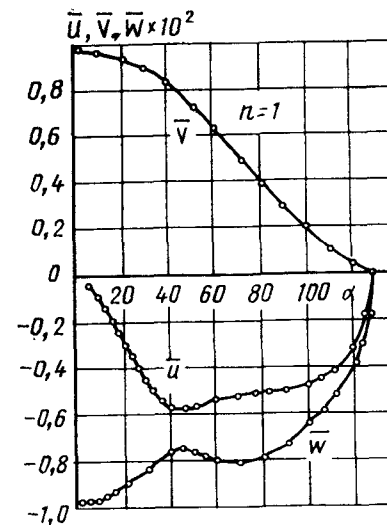
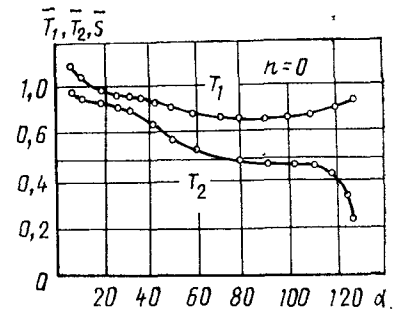
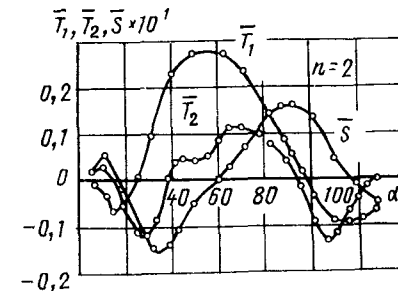
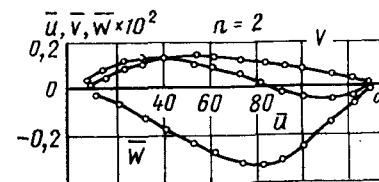
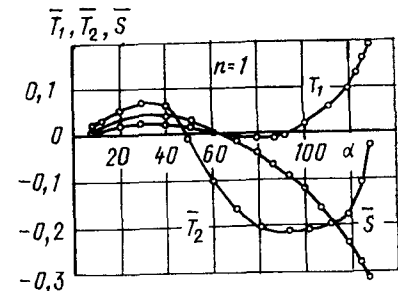


Рис. 16



ного деформированного состояния самых различных конструкций. Введение некоторых дополнительных упрощений позволяет построить приближенные аналитические решения сложных задач. Они бывают необходимы для оценки величин усилий и перемещений и являются основой для дальнейших уточнений. Общая теория использована при создании систем алгоритмов и программ расчета, основанных на применении ЭВМ и современных дискретных методов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Матрицы уравнений равновесия технической теории мягких оболочек:

$$[L3] = \begin{bmatrix} \left(-\frac{\partial T_{10}}{A \partial \alpha} - T_{10} \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \right) & \left(-S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \right) & \left(-T_{20} \frac{1}{R_2} \right) \\ \left(+S_0 \frac{\partial}{B \partial \beta} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) & \left(+T_{10} \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) & \\ \left(-\frac{\partial S_0}{A \partial \alpha} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \right) & \left(S_0 \frac{\partial}{B \partial \beta} + T_{10} \frac{\partial}{A \partial \beta} + \right) & \left(S_0 \frac{1}{R_2} \right) \\ \left(+T_{20} \frac{\partial}{B \partial \beta} + T_{10} \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) & \left(+T_{20} \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) & \\ \left(T_{10} \frac{1}{R_1} \right) & \left(-S_0 \frac{1}{R_2} \right) & \left(T_{10} \frac{\partial}{A \partial \alpha} + S_0 \frac{\partial}{B \partial \beta} + \right) \\ & & \left(+T_{20} \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) \end{bmatrix};$$

$$[L4] = \begin{bmatrix} \left(S_0 \frac{\partial}{A \partial \alpha} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \right) & \left(-\frac{\partial S_0}{B \partial \beta} - \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} S_0 + \right) & \left(S_0 \frac{1}{R_1} \right) \\ \left(+T_{20} \frac{\partial}{B \partial \beta} + T_{10} \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) & \left(+T_{10} \frac{\partial}{A \partial \alpha} + T_{20} \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \right) & \\ \left(-S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} + \right) & \left(S_0 \frac{\partial}{A \partial \alpha} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - \right) & \left(-T_{10} \frac{1}{R_1} \right) \\ \left(+T_{20} \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \right) & \left(-T_{20} \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} - \frac{\partial T_{20}}{B \partial \beta} \right) & \\ \left(-S_0 \frac{1}{R_1} \right) & \left(T_{20} \frac{1}{R_2} \right) & \left(T_{20} \frac{\partial}{B \partial \beta} + T_{10} \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} + \right) \\ & & \left(+S_0 \frac{\partial}{A \partial \alpha} - S_0 \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \right) \end{bmatrix}$$

Матрицы граничных условий:

$$[F1] = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{13} & 0 \\ C_{31} & C_{33} + T_{10} & 0 \\ 0 & 0 & -T_{10} \end{bmatrix}; [F2] = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} C_{13} + S_0 & C_{12} & 0 \\ C_{33} & C_{32} & 0 \\ 0 & 0 & S_0 \end{bmatrix};$$

$$[F3] = \frac{1}{AB} \begin{bmatrix} C_{12} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - C_{13} \frac{\partial A}{\partial \beta} & C_{11} \frac{\partial A}{\partial \beta} - C_{13} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - S_0 \frac{\partial B}{\partial \alpha} \frac{AB}{R_1} C_{11} + \frac{AB}{R_2} C_{12} \\ C_{32} \frac{\partial B}{\partial \alpha} - C_{33} \frac{\partial A}{\partial \beta} - T_{10} \frac{\partial A}{\partial \beta} & C_{31} \frac{\partial A}{\partial \beta} - C_{33} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \frac{AB}{R_1} C_{31} + \frac{AB}{R_2} C_{32} \\ 0 & -\frac{AB}{R_2} S_0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрицы уравнений равновесия оболочки вращения (основное состояние осесимметрично):

$$[L1] = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} + \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} + \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 \\ \left(-\frac{1}{R_1} \right) & 0 & 0 \end{bmatrix}; [L2] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{r \partial \beta} - \frac{\cos \alpha}{r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{r \partial \beta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L3] = \begin{bmatrix} \left(-\frac{\partial T_{10}}{R_1 \partial \alpha} - T_{10} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 & \left(-T_{20} \frac{1}{R_2} \right) \\ \left(T_{20} \frac{\partial}{r \partial \beta} \right) & \left(T_{10} \frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} + T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 \\ \left(T_{10} \frac{1}{R_1} \right) & 0 & \left(T_{10} \frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} + T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) \end{bmatrix};$$

$$[L4] = \begin{bmatrix} \left(T_{20} \frac{\partial}{r \partial \beta} \right) & \left(T_{10} \frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} + T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 \\ \left(T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 & \left(-T_{10} \frac{1}{R_1} \right) \\ 0 & \left(T_{20} \frac{1}{R_2} \right) & \left(T_{20} \frac{\partial}{r \partial \beta} \right) \end{bmatrix}.$$

Матрицы геометрических соотношений оболочки вращения:

$$[B1] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} & 0 & \frac{1}{R_1} \\ 0 & \frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 & \frac{\partial}{R_1 \partial \alpha} \end{bmatrix}; [B2] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{r \partial \beta} - \frac{\cos \alpha}{r} & 0 \\ \frac{\cos \alpha}{r} & \frac{\partial}{r \partial \beta} & \frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{\partial}{r \partial \beta} \end{bmatrix}.$$

Матрицы уравнений равновесия оболочки вращения для каждой гармоники m (применение метода разделения переменных):

$$[L1]_m = \begin{bmatrix} \left(\frac{d}{R_1 d\alpha} + \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{d}{R_1 d\alpha} + \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}; [L2]_m = \begin{bmatrix} \frac{m}{r} - \frac{\cos \alpha}{r} & 0 \\ 0 & -\frac{m}{r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L3]_m = \begin{bmatrix} \left(-\frac{dT_{10}}{R_1 d\alpha} - T_{10} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 & \left(-T_{20} \frac{1}{R_2} \right) \\ \left(-T_{20} \frac{m}{r} \right) & \left(T_{10} \frac{d}{R_1 d\alpha} + T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 \\ \left(T_{10} \frac{1}{R_1} \right) & 0 & \left(T_{10} \frac{d}{R_1 d\alpha} + T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) \end{bmatrix};$$

$$[L4]_m = \begin{bmatrix} \left(T_{20} \frac{m}{r} \right) & \left(T_{10} \frac{d}{R_1 d\alpha} + T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 \\ \left(T_{20} \frac{\cos \alpha}{r} \right) & 0 & \left(-T_{10} \frac{1}{R_1} \right) \\ 0 & \left(T_{20} \frac{1}{R_2} \right) & \left(T_{20} \frac{m}{r} \right) \end{bmatrix}.$$

Матрицы геометрических соотношений для каждой гармоники:

$$[B1]_m = \begin{bmatrix} \frac{d}{R_1 d\alpha} & 0 & \frac{1}{R_1} \\ 0 & \frac{d}{R_1 d\alpha} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 & \frac{d}{R_1 d\alpha} \end{bmatrix}; [B2]_m = \begin{bmatrix} -\frac{m}{r} - \frac{\cos \alpha}{r} & 0 & 0 \\ \frac{\cos \alpha}{r} & \frac{m}{r} & \frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & -\frac{m}{r} \end{bmatrix}.$$

Преобразование дифференциального уравнения в конечно-разностное [точность $O(h^4)$] дано в табл. 1 и 2.

Компоненты матриц $[B1]$, $[B2]$, $[B3]$ дифференциального уравнения (9.3):

$$[B1]_{ij}^k = [A1]_{ij}; [B3]_{ij}^k = -\frac{1}{12h_\beta^2} [A3]_{ij} - \frac{1}{12h_\beta} [A5]_{ij};$$

$$[B2]_{ij}^k = -\frac{1}{12h_\beta} [A2]_{ij}; [B3]_{i,n+j}^k = \frac{4}{3h_\beta^2} [A3]_{ij} - \frac{2}{3h_\beta} [A5]_{ij};$$

$$[B2]_{i,n+j}^k = \frac{2}{3h_\beta} [A2]_{ij}; [B3]_{i,2n+j}^k = -\frac{5}{2h_\beta^2} [A3]_{ij} + [A6]_{ij};$$

Таблица 1

	$i+2$	$i+1$	i	$i-1$	$i-2$	
$\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}$			$[A1] \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}$			$[A1]$
$\frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \beta}$				$-\frac{2}{3h_\beta} [A2] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$\frac{1}{12h_\beta^2} [A2] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$[A2]$
$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2}$	$-\frac{1}{12h_\beta^2} [A3]$	$\frac{4}{3h_\beta^2} [A3]$	$-\frac{5}{2h_\beta^2} [A3]$	$\frac{4}{3h_\beta^2} [A3]$	$-\frac{1}{12h_\beta^2} [A3]$	$[A3]$
$\frac{\partial}{\partial \alpha}$			$[A4] \frac{\partial}{\partial \alpha}$			$[A4]$
$\frac{\partial}{\partial \beta}$	$-\frac{1}{12h_\beta} [A5]$	$\frac{2}{3h_\beta} [A5]$		$-\frac{2}{3h_\beta} [A5]$	$\frac{1}{12h_\beta^2} [A5]$	$[A5]$
$[A6]$			$[A6]$			$[A6]$
			$[D3]$	$[D4]$	$[D5]$	
			$[D2]$			
			$[D1]$			

$$[B2]_{i,2n+j}^k = [A4]_{ij}; [B3]_{i,3n+j}^k = \frac{4}{3h_p^2} [A3]_{ij} - \frac{2}{3h_p} [A5]_{ij};$$

$$[B2]_{i,3n+j}^k = -\frac{2}{3h_p} [A2]_{ij}; [B3]_{i,4n+j}^k = -\frac{1}{12h_p^2} [A3]_{ij} + \frac{1}{12h_p} [A5]_{ij};$$

$$[B2]_{i,4n+j}^k = \frac{1}{12h_p} [A2]_{ij};$$

$$(i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; n = 3).$$

Таблица 2

[D1]		$-\frac{1}{12h_p} [A2] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$-\frac{1}{12h_p^2} [A3] - \frac{1}{12h_p} [A5]$
[D2]		$\frac{2}{3h_p} [A2] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$\frac{4}{3h_p^2} [A3] - \frac{2}{3h_p} [A5]$
[D3]	$[A1] \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}$	$[A4] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$\frac{5}{2h_p^2} [A3] + [A6]$
[D4]		$-\frac{2}{3h_p} [A2] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$\frac{4}{3h_p^2} [A3] - \frac{2}{3h_p} [A5]$
[D5]		$\frac{1}{12h_p} [A2] \frac{\partial}{\partial \alpha}$	$-\frac{1}{12h_p^2} [A3] + \frac{1}{12h_p} [A5]$
	$[B1] \frac{d^2}{d\alpha^2}$	$[B2] \frac{d}{d\alpha}$	[B3]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С. А. Основы общей теории мягких оболочек.— В сб.: Расчет пространственных конструкций. Вып. XI, М., 1967.
2. Григорьев А. С. Равновесие безмоментной оболочки вращения при больших деформациях.— Прикладная математика и механика, 1961, т. 25, вып. 6.
3. Грин А., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. М., Мир, 1965.
4. Усюкин В. И. Об уравнениях теории больших деформаций мягких оболочек.— Известия АН СССР, МТТ, 1976, № 1.
5. Балабух Л. И., Усюкин В. И. Приближенная теория мягких оболочек вращения.— Труды VIII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. Ростов-на-Дону, 1971.
6. Усюкин В. И. Деформации мембранных оболочек вращения.— Известия АН СССР. Механика и машиностроение, № 2, 1964.

7. Усюкин В. И., Терещенко В. А., Борсов Р. Г. Разностные методы решения двумерных задач статики мягких оболочек.— В сб.: Расчет пространственных конструкций. Вып. XVIII, М., 1979.

8. Усюкин В. И. Деформация мембранной торообразной оболочки.— Труды VII Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек. Днепропетровск, 1969.

9. Сдобников А. Н. Применение метода конечных элементов к расчету мягких оболочек вращения.— Сообщения Дальневосточного высшего инженерно-морского училища. Вып. 34. Владивосток, 1976.

10. Усюкин В. И., Терещенко В. А., Сдобников А. Н., Панов С. В. Расчет пневматических строительных конструкций с использованием ЭВМ. Доклады Международной конференции по облегченным пространственным конструкциям ИАСС. М., Стройиздат, 1977.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Э. Хауг (Франция)

Численные методы [14—17]. В статье рассматриваются вопросы системного проектирования, разработки конструктивных решений и расчета легких и пневматических конструкций¹ с общих позиций расчетчика, использующего численные методы, и проектировщика-конструктора.

Если еще в недавнем прошлом системное проектирование пневматических конструкций выполнялось архитекторами, анализ их формы — специалистами по моделированию, расчет конструктивных элементов — инженерами-конструкторами, а некоторые статические расчеты — специалистами по оболочкам, то сейчас все перечисленные задачи может самостоятельно решить любой из этих специалистов, используя современную программу численного расчета и вычислительное устройство размером с обычный микрокалькулятор. Разработка такого рода программы, получившей название РАМ — LISA по начальным буквам английских слов Programs in Advanced Mechanics — Lightweight Structures Analysis (программы в современной механике — расчет легких конструкций), изложена в данной статье. Есть все основания надеяться на значительный эффект, который может быть достигнут благодаря унификации методов расчета и проектирования, преодолению узкой специализации разработчиков конструкций и использованию поистине неограниченных возможностей современной вычислительной техники.

Использование современных вычислительных программ в значительной степени сводится к набору стереотипных операций, и поэтому при некотором навыке вполне доступно любому, кто доста-

¹ Автор использует термин «легкие конструкции» в качестве общего названия тросовых систем и мягких оболочек (Прим. перев.).

точно хорошо представляет себе рассчитываемую конструкцию в ее физическом и инженерном аспектах. Работа с программой строится на интуитивной основе, подобно работе физика-экспериментатора или мастера-модельщика, и не имеет ничего общего с подходом математика, пользующегося аналитическими методами. Специалист, работающий с программой, может получить результат своей работы сразу в законченном виде и к тому же значительно быстрее, чем при использовании громоздких формул, утомительных выкладок и бесконечного ручного счета.

В статье не рассматриваются способы составления программ и преобразования физических зависимостей в численные алгоритмы. Машинные языки и алгоритмы — забота разработчиков программ, а не их пользователей, которым адресована эта статья.

Пневматические конструкции [1—3, 9—13, 24]. Эти конструкции обычно представляют собой мягкие (тканевые) оболочки, характеризующиеся пренебрежимо малой изгибной жесткостью. Несущая способность пневмооболочек может быть повышена наложением на них усиливающих канатов или тросовых сеток. Поэтому в качестве основных составных частей пневмооболочек при их машинном расчете рассматриваются элементы собственно оболочки (мембранные элементы) и тросовые элементы. Стабильность формы пневматических конструкций обеспечивается внутренним давлением, вызывающим в воздухонепроницаемой оболочке (мембране) растягивающие усилия, которые воспринимаются самой оболочкой или передаются ею на несущую систему следующего уровня в структурной иерархии конструкции.

Воздухоопорные пневматические сооружения — это типичные оболочки низкого давления; постоянное внутреннее давление в них измеряется несколькими сантиметрами водяного столба. Трубчатые элементы пневмокаркасных сооружений и автомобильные шины — примеры оболочек высокого давления, измеряемого несколькими атмосферами. Мембраны и оболочки под гидростатической нагрузкой можно также рассматривать как своего рода пневматические оболочки, нагруженные нормальным давлением, переменным по поверхности. Существует еще целый мир биологических пневматических конструкций, рассмотрение которого, однако, выходит за рамки данной статьи, посвященной исключительно техническим пневматическим оболочкам.

Методика расчета [13, 20—22]. Методика расчета мягких оболочек (мембран), имеющая целью отыскание формы оболочки, ее раскрой и определение усилий, была разработана в связи с составлением машинной программы RAM—LISA. Однако эта методика в достаточной степени универсальна и не связана непосредственно с численным методом расчета, для которого она была первоначально использована. Та же самая методика может быть реализована, например, и при чисто эмпирическом подходе к расчету, хотя и в этом случае некоторые из необходимых этапов расчета легче выполнять численным методом. Вряд ли требуется лучшее доказательство гибкости численных методов расчета и их независимости

от применяемых технических средств, чем очевидная взаимозаменяемость их с «физическими» методами. Это наглядно демонстрирует подлинную эффективность современных численных методов и служит достаточным вознаграждением для разработчиков программ за их нередко каторжный труд.

Метод конечных элементов. При использовании метода конечных элементов (МКЭ) конструкция надлежащим образом расчленяется на множество элементарных структурных единиц, реакции которых на приложенные к ним деформации и усилия могут быть запрограммированы для автоматизированного расчета на ЭВМ. Структурная единица (конечный элемент) может представлять собой прямолинейный отрезок троса (тросовый элемент), четырехугольный участок мембраны (мембранный элемент), недеформированный отрезок балки (балочный элемент), кубик в объеме массивной конструкции («блочный» элемент) и т. п. в зависимости от типа рассчитываемой конструкции.

После того, как реальная конструкция представлена расчетчиком в виде ансамбля (сетки) таких элементов, ЭВМ рассчитывает характеристики жесткости всех элементов и действующие в них усилия, объединяя полученные данные в систему уравнений равновесия в узлах (точках пересечения элементов). В результате решения этой системы на ЭВМ определяют перемещения узлов, по которым в соответствии с программой рассчитывают деформации и напряжения в каждом из конечных элементов.

Если условие равновесия конструкции зависит от ее деформированной формы (т. е. конструкция является геометрически нелинейной), что характерно, за малым исключением, для всех легких конструкций, то решение выполняют путем итераций, причем на каждом шаге расчета определяют новое очертание конструкции, служащее основой для последующего шага итерационного процесса.

Реализация МКЭ автоматизирована в такой степени, что для его успешного применения не требуется подробное знание функциональных аспектов метода. Это дает проектировщику возможность создавать конструкцию, используя данный метод интуитивно и чисто эмпирически, и требует от него почти исключительно лишь физического понимания технических аспектов формы конструкции и ее поведения под нагрузкой.

Программа для ЭВМ [21]. Приведенные в этой статье примеры конструктивных форм рассчитаны по машинной программе RAM—LISA, использующей МКЭ для решения статических и динамических задач, либо по более раннему варианту этой программы (под названием MASL). Программа разрабатывалась автором начиная с 1969 г. сначала в Калифорнийском университете в Беркли (США) под руководством проф. Пауэлла, затем в Париже, потом в Эссене в институте проф. Бубнера (совместно с Эльберманом) и снова в Париже в фирме «Инджиниринг систем интернэшнел».

Задачи проектирования. Проблема проектирования зданий и сооружений является комплексной и требует объединения усилий

специалистов различных дисциплин. Архитектурное проектирование оперирует с такими категориями, как система, форма, функция, красота, влияние среды, технология, человеческие потребности, природа. Инженерное проектирование имеет дело с конструктивными системами, материалами, конструктивными размерами и элементами, внешними воздействиями. В инженерном расчете учитываются нагрузки, деформации и напряжения, вибрации, разрушения, надежность.

Существует мнение, что взаимосвязь архитектурного и инженерного проектирования является недостаточно тесной или вообще отсутствует. Более парадоксально, что недостаточна также взаимосвязь инженерного проектирования и инженерного расчета. Дело обстоит таким образом, что результаты инженерного расчета редко приводят к пересмотру концепций, принятых при инженерном проектировании, а соображения инженерного проектирования зачастую вообще не учитываются в архитектурных решениях. Такого положения не должно быть при создании легких конструкций, поскольку здесь существует по меньшей мере взаимозависимость между конструктивной системой и формой, между конструктивным решением и размерами конструкции, между нагрузками и деформациями. В этом смысле проблема проектирования легких конструкций может быть решена только на стыке различных дисциплин.

В настоящей статье рассматриваются инженерный расчет и системное проектирование легких конструкций. Здесь под инженерным расчетом подразумеваются отыскание точной формы конструкции и ее расчет на действующие нагрузки; при этом задача отыскания формы конструкции является для инженера-проектировщика новой и в то же время наиболее сложной. Обе проблемы могут быть решены на основе либо физического, либо численного эксперимента, т. е. с применением численного метода, как показано ниже.

Тросовые системы (рис. 1—7). Вопросы расчета тросовых систем освещены в работах [1, 4—8]. При использовании МКЭ тросовая система (рис. 1, а) предполагается состоящей из тросовых элементов (рис. 1, б). Простейший линейно-упругий прямолинейный тросовый элемент имеет две узловые точки и характеризуется своей начальной длиной L_0 , модулем упругости E и площадью поперечного сечения A . Тросовая система образуется из элементов, соединенных между собой в узловых точках, которыми являются точки пересечения тросов или промежуточные точки отдельного криволинейного свободно висящего троса (рис. 1, в). Каждый тросовый элемент передает от узла к узлу растягивающее усилие; если элемент может передавать также сжимающее усилие, его называют стержневым элементом (рис. 1, г).

При линейно-упругом материале растягивающее (сжимающее) усилие в элементе пропорционально изменению его длины (рис. 2, а). Возможен также учет нелинейно-упругих, пластических и вязкоупругих (зависящих от времени) деформаций материала (рис. 2, б—г).

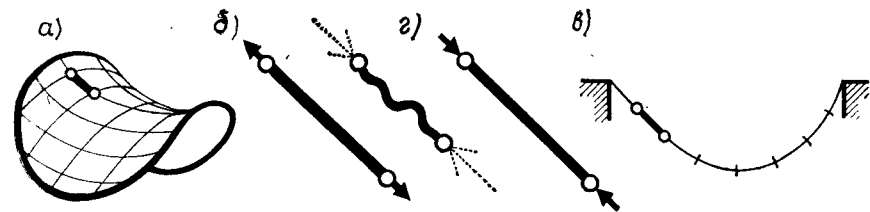


Рис. 1

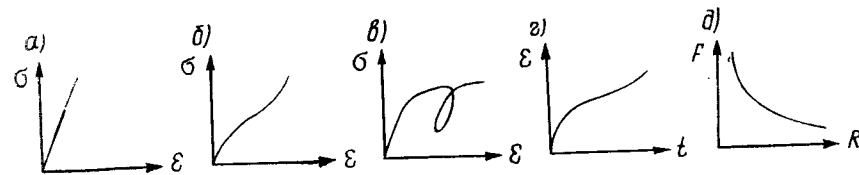


Рис. 2

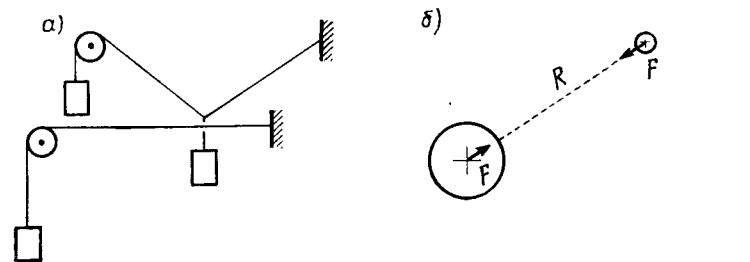


Рис. 3

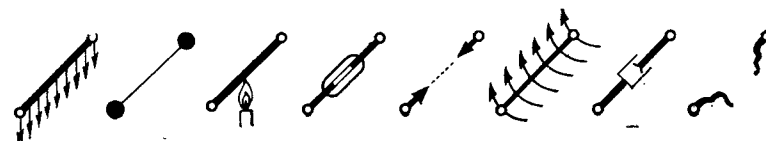


Рис. 4

Для расчета формы перекрестных тросовых систем (сеток) необходимо введение напрягающих или стабилизирующих, тросовых элементов (рис. 3, а). Физически каждый из таких элементов подобен тросу, перекинутому через вращающийся без трения блок и натянутому грузами постоянного веса. При численном расчете напрягающий элемент, соединяющий два узла, характеризуется отсутствием сопротивления продольным деформациям и заданным значением (положительным или отрицательным) передаваемого им усилия.

Возможно также использование так называемых гравитационных элементов (рис. 3, б), т. е. тросовых элементов, усилия в которых обратно пропорциональны квадрату их длины и прямо пропорциональны произведению связанных ими масс (рис. 2, д). Благо-

даря этому можно распространить область применения программы расчета тросовых систем на расчеты движения небесных тел.

При необходимости могут быть использованы и тросовые элементы более общего вида, обладающие заданными характеристиками собственного веса, массы, изменения свойств при температурных воздействиях, регулируемой длины, предварительного напряжения, лобового сопротивления (при движении в вязких средах, воде, воздухе), внутреннего трения, разрушения и т. п. (рис. 4).

Включение в программу расчета всех перечисленных вариантов позволяет решать весьма широкий круг задач с использованием одного и того же расчетного аппарата. В качестве примеров можно привести выполненные по разработанной автором программам расчеты модели вантового покрытия института Ф. Отто в Вайхингене (рис. 5), висячего тросового покрытия с шестиугольными ячейками (рис. 6), трансформируемого сетчатого покрытия (рис. 7); эти работы были выполнены в Беркли (США) в 1969 г. Модифицированный вариант программы был использован для расчета колебаний длинных якорных тросов при волновом воздействии и для расчета движения системы двух искусственных спутников Земли, связанных тросом; эти работы выполнены в Париже в 1975 и 1979 гг.

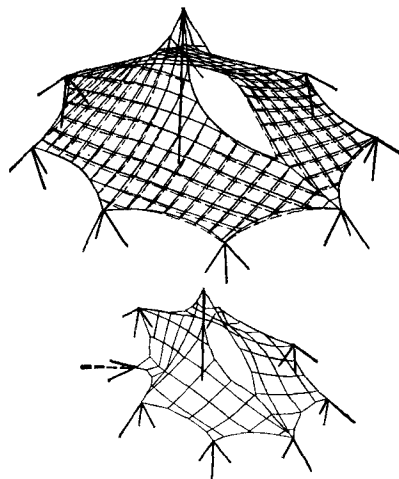


Рис. 5

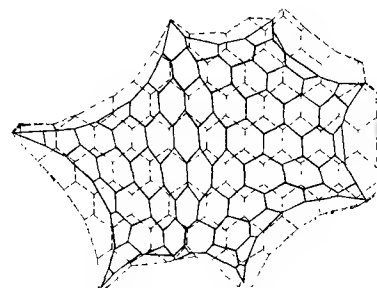
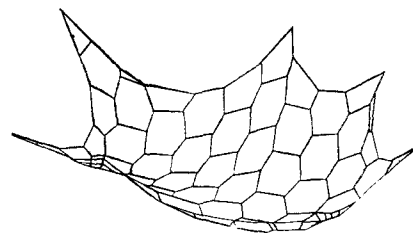
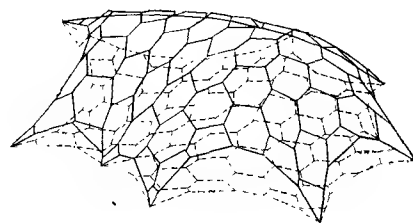
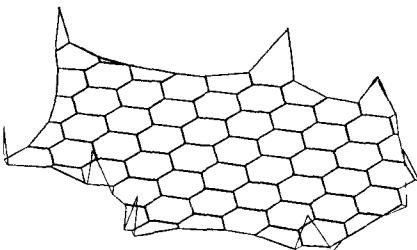


Рис. 6

Рис. 7

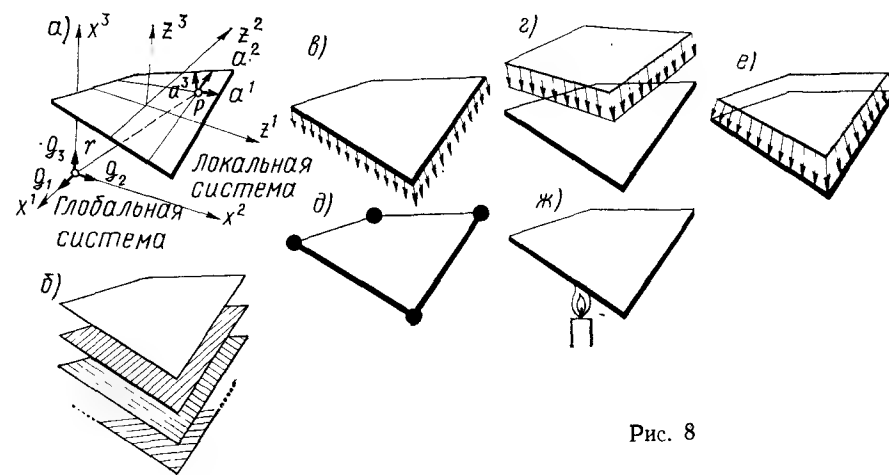
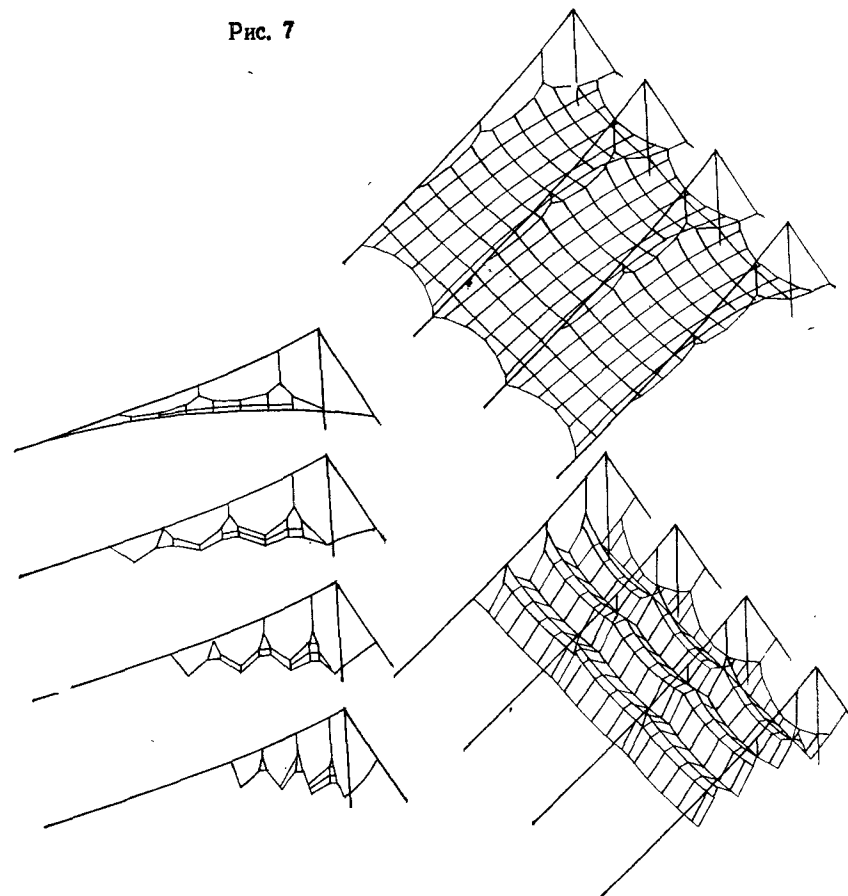


Рис. 8

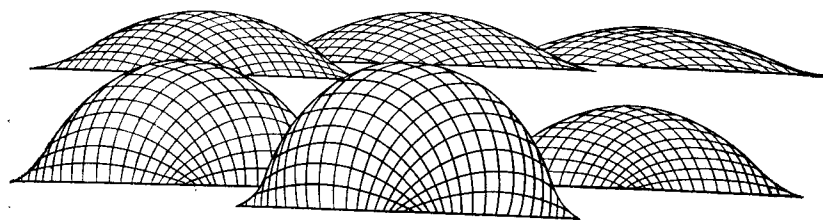


Рис. 13

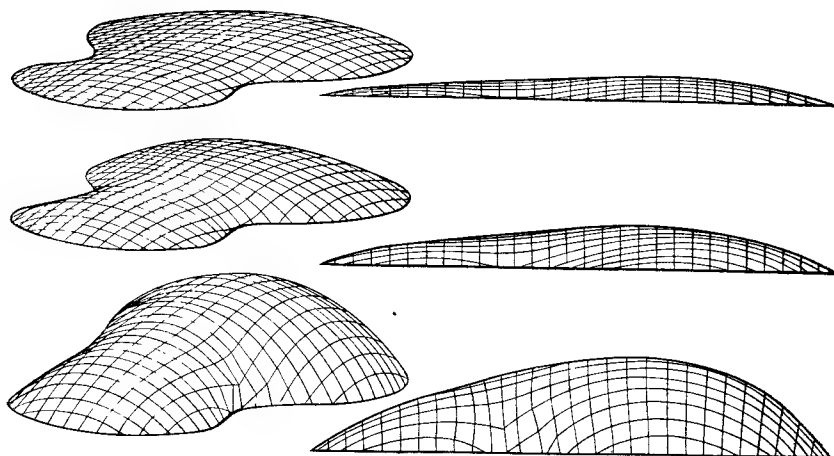


Рис. 14

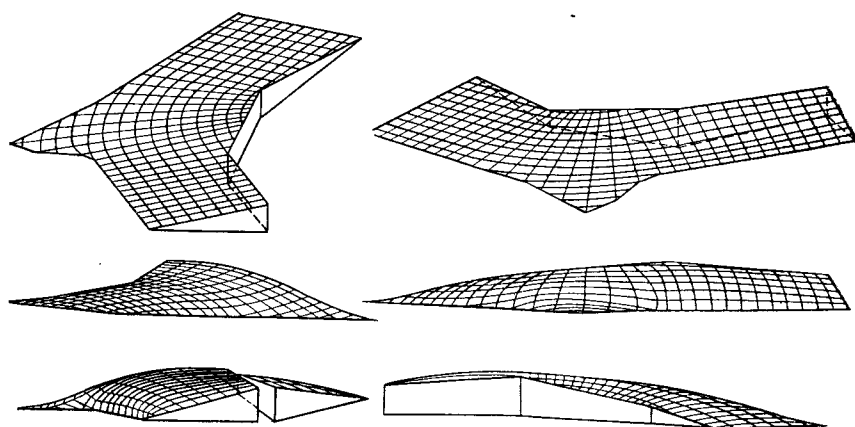


Рис. 15

ние которой однозначно определяется заданными напряжениями и внешними нагрузками.

Реальные мягкие оболочки в большинстве случаев изготавливают из ортотропных материалов, обладающих различной прочностью и

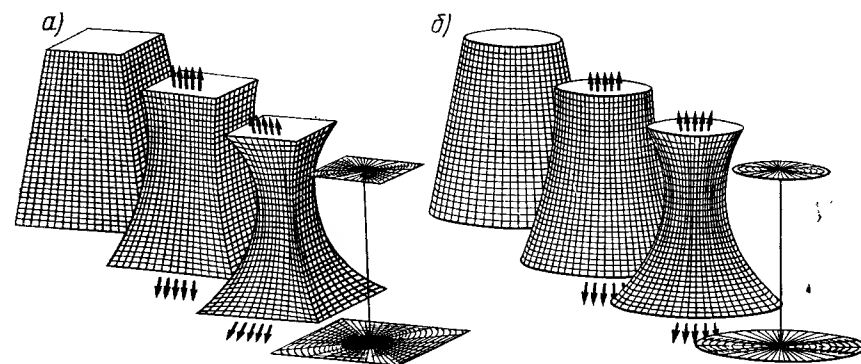


Рис. 16

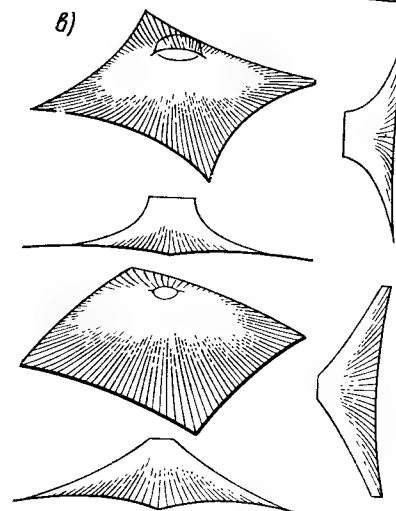
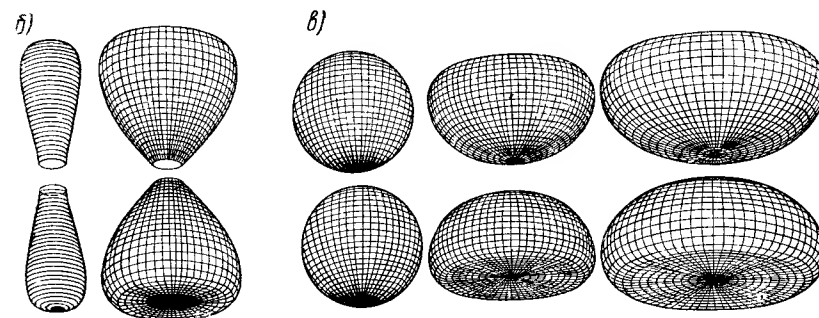
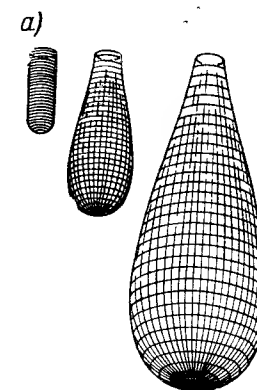


Рис. 17



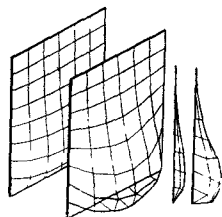


Рис. 19

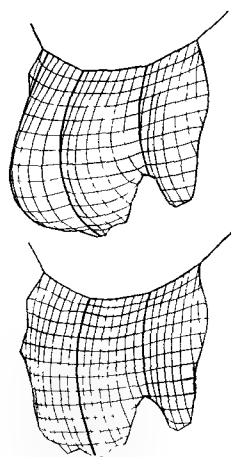


Рис. 20

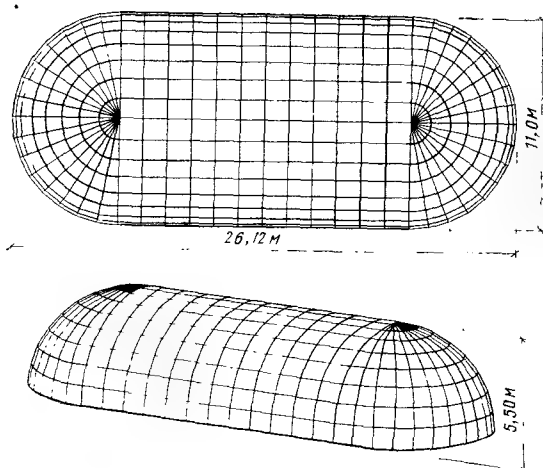
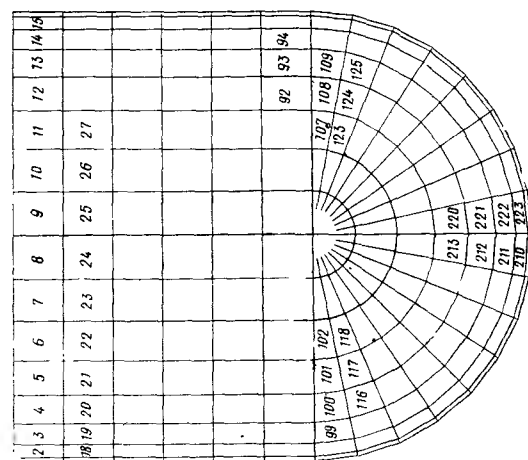


Рис. 21. Воздухоопорная оболочка, начальная форма (толщина материала 0,6 мм, модуль упругости в направлении утка 500 МПа, в направлении основы — 1500 МПа, коэффициент Пуассона 0,45)

жесткостью в двух взаимно перпендикулярных направлениях (соответствующих ориентации армирующих волокон). При этом «чистой» форме оболочки более соответствовала бы форма мыльной пленки с неравномерным распределением натяжений. Хотя в природе таких анизотропных «мыльных пленок» и не существует, они могут быть смоделированы численно, например, наложением на

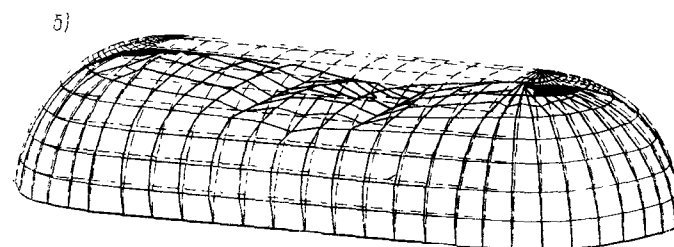
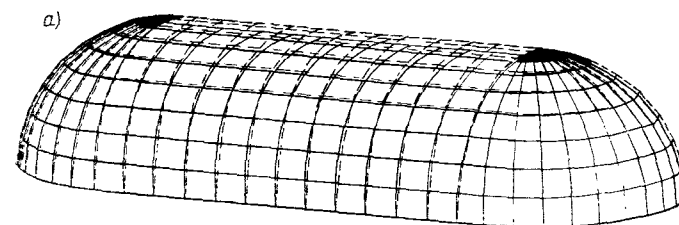


Рис. 22. Воздухоопорная оболочка. Полная снеговая нагрузка ($p_s=250 \text{ Н/м}^2$)
а и б — внутреннее давление соответственно 600 и 300 Па

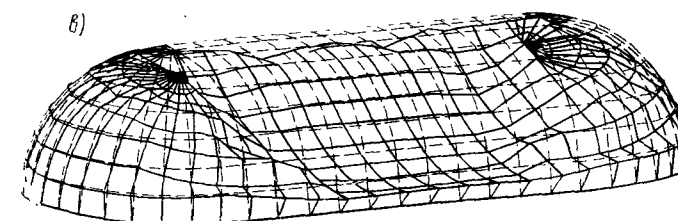
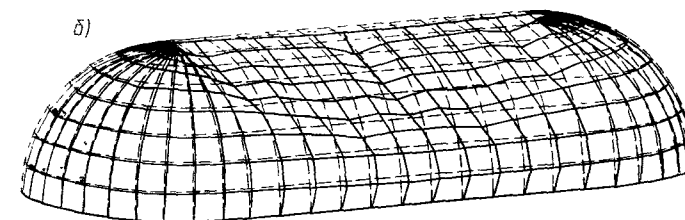
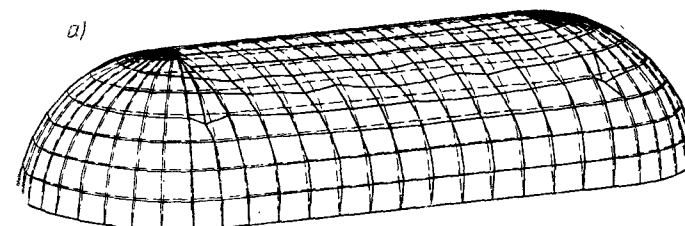


Рис. 23. Воздухоопорная оболочка. Односторонняя снеговая нагрузка ($p_s \approx 500 \text{ Н/м}^2$)
 а, б, в — внутреннее давление соответственно 600, 450 и 300 Па

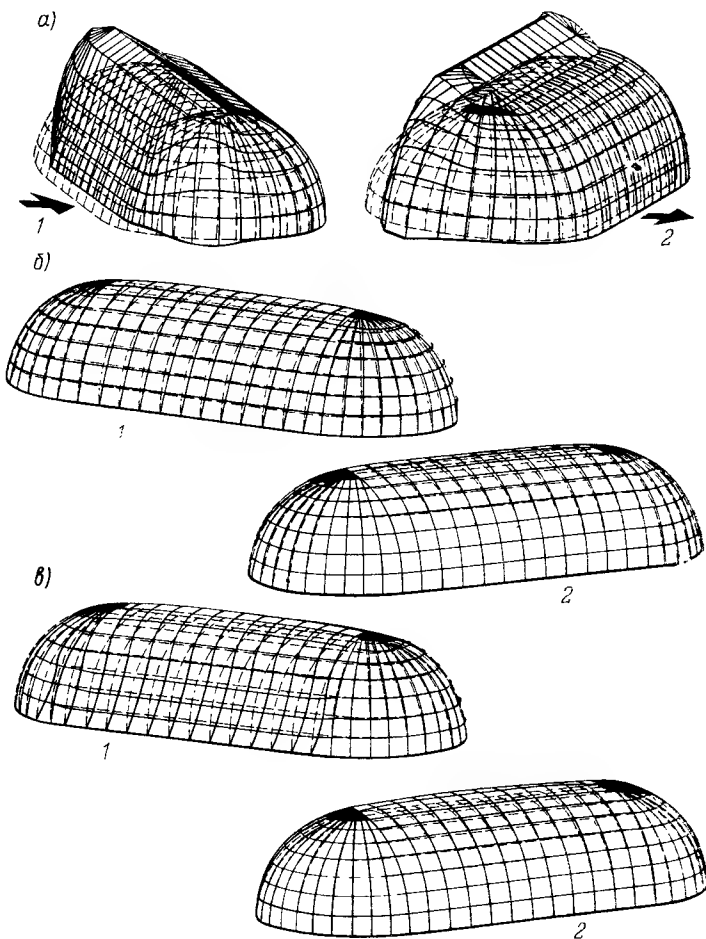


Рис. 24. Деформации воздухопорной оболочки под встровой нагрузкой $p=500 \text{ Н/м}^2$

a — распределение нормального давления ветра; *б, в* — внутреннее давление соответственно 600 и 300 Па; 1 — наветренная сторона; 2 — подветренная сторона

оболочку из изотропных пленочных элементов сетки напрягающих тросов (рис. 16). Таким образом можно численно рассчитать форму оболочки с заданным анизотропным напряженным состоянием.

Методика нахождения раскроя мягких оболочек на основе форм мыльных пленок (рис. 25) рассмотрена в следующем разделе.

Методика проектирования мягких оболочек [13, 20]. Раскрой мягкой оболочки представляет собой набор плоских ненапряженных сегментов, вырезанных из реального материала оболочки (см. рис. 25). Геометрия раскроя должна удовлетворять условию наилучшего приближения к заданным форме и напряженному состоянию оболочки после соединения ее элементов и приведения обо-

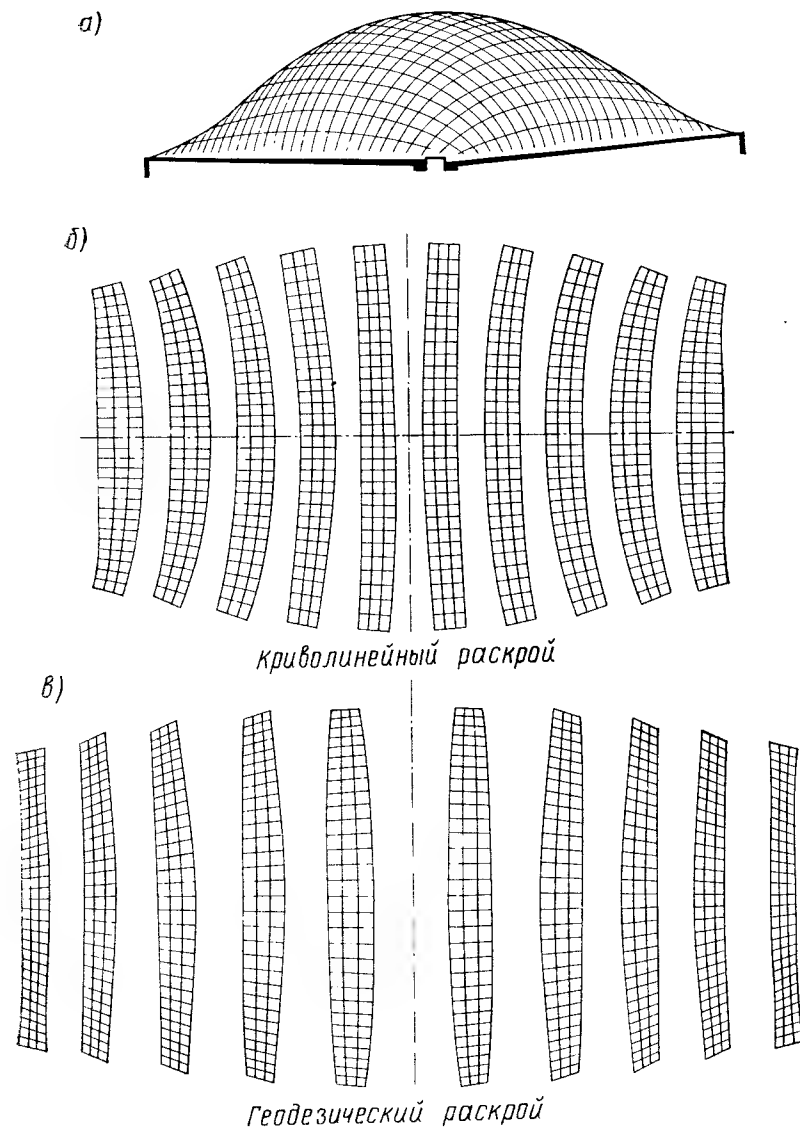


Рис. 25

лочки в проектное положение. Из практических соображений обычно наиболее удобен раскрой в виде длинных прямолинейных полос материала (рис. 25, в). Ниже на примере пневматической оболочки излагается последовательность этапов численного расчета оптимального раскроя.

Этап 1. Нахождение формы (рис. 26, а). Рассчитывают идеализированную («чистую») форму оболочки с использованием изотроп-

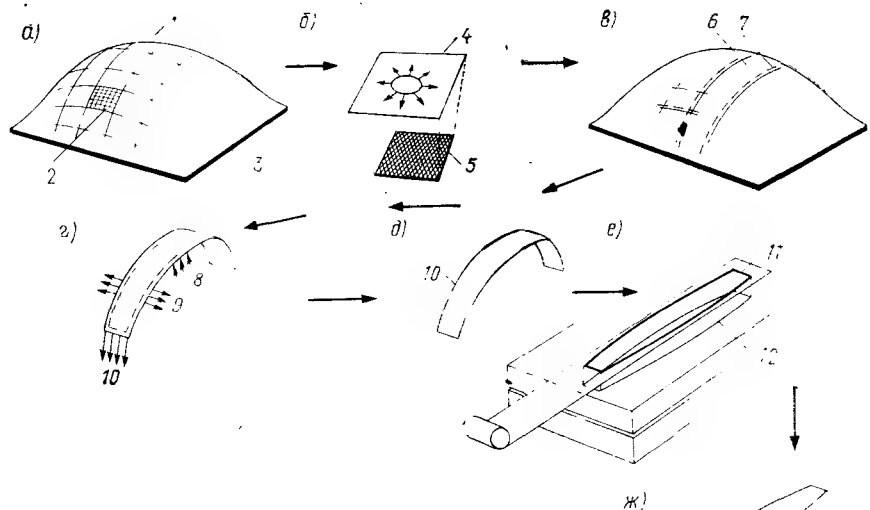


Рис. 26. Этапы численного расчета оптимального раскрой

а — нахождение формы; б — замена под напряжением; в — нахождение выкройки; г — выравнивание; д — превращение выкройки в плоскую; е — окончательное выравнивание; ж — возведение; 1 — мыльная пленка (первоначально плоская); 2 — конечный элемент, поверхностное натяжение σ_0 ; 3 — жесткий контур; 4 — элемент мыльной пленки; 5 — замена упругим элементом, испытывающим натяжение σ_0 ; 6 — выкроенное полотнище; 7 — наложенная тросовая сеть постоянного натяжения, пересекающая узлы по геодезическим линиям (штриховые линии); 8 — давление; 9 — поверхностное натяжение σ_0 ; 10 — релаксированная выкройка с $\sigma=0$; 11 — окончательная выкройка; 12 — уплощенная выкройка с натяжением $\pm \Delta \sigma$; 13 — окончательная выкройка, имеющая такую же форму, что и уплощенная; 14 — нахлест; 15 — смонтированное полотнище с натяжениями $\sigma_0 \pm \Delta \sigma$; $\Delta \sigma_1 \approx -\Delta \sigma_0$

ных или анизотропных пленочных элементов при наличии или отсутствии внутреннего давления. Например, при жестком прямоугольном контуре «чистая» форма оболочки образуется раздуванием первоначально плоской сетки пленочных элементов.

Этап 2. Замена напряженных элементов (рис. 26, б). Каждый из пленочных элементов в найденной «чистой» форме оболочки заменяют упругим мембранным элементом таким образом, чтобы он занимал то же положение в пространстве и имел то же напряженное состояние. Это означает, что каждый заменяющий упругий мембранный элемент должен иметь в исходном состоянии меньшие размеры, чем соответствующий пленочный элемент; заданное напряженное состояние элемента достигается благодаря растяжению материала. Определение «редуцированных» размеров элементов осуществляют автоматически по программе.

Этап 3. Выбор схемы раскрой (рис. 26, в). Задают принципиальную схему раскрой оболочки, например, в виде набора полос, причем ширину их принимают кратной размеру конечного элемента. Если полосы раскрой ориентированы вдоль геодезических линий поверхности «чистой» формы оболочки (так называемый гео-

дезический раскрой), то их развертка на плоскость оказывается наиболее близкой к прямолинейной. Сетку узловых точек пленочных элементов на поверхности «чистой» формы оболочки можно легко приблизить к геодезической путем наложения на нее минимальной сетки натягающих тросов с одинаковым натяжением. Усилия в этих «вспомогательных» тросах могут быть весьма невелики, поскольку в реальных мыльных пленках частицы жидкости свободно перемещаются по поверхности, не испытывая сопротивления материала; это свойство учитывается и численной моделью.

Этап 4. Раскрой полотнищ (рис. 26, г). Полотнища материала, соответствующие принятой схеме раскрой, вырезают из находящейся в напряженном состоянии оболочки; при этом напряжения в них снимаются. В свободном от напряжений состоянии эти элементы оболочки принимают форму сегментов двойной кривизны.

Этап 5. «Уплотнение» выкройки (рис. 26, д). Свободные от напряжений сегменты развертывают на плоскость таким образом, чтобы работа необходимой для этого деформации материала была минимальной. Такая развертка соответствует наименее стесненной плоской форме элементов раскрой, при которой в них появляются минимальные самоуравновешенные напряжения, тогда как в идеальном случае материал должен быть вообще свободен от напряжений.

Этап 6. Окончательный раскрой (рис. 26, е). Окончательный раскрой оболочки осуществляют путем разрезки материала оболочки (без натяжения) на полосы, форма которых точно соответствует очертанию развертки сегментов оболочки на плоскость.

Этап 7. Возведение (рис. 26, ж). Проектную форму оболочки находят путем соединения элементов окончательного раскрой и приложения к ним всех действующих нагрузок (усилий). Оболочка в проектном положении будет иметь в общем то же напряженное состояние, что и ее «чистая» форма; дополнительные напряжения примерно соответствуют напряжениям, возникающим при развертке криволинейных сегментов оболочки на плоскость, но с обратным знаком. Эти дополнительные напряжения вызваны деформациями, необходимыми для придания двойной кривизны первоначально плоским элементам раскрой оболочки. В силу сопротивления элементов раскрой этим деформациям проектная форма оболочки также будет несколько отличаться от «чистой» формы. Однако при использовании описанной выше процедуры расчета указанные неизбежные отклонения формы и напряженного состояния оболочки от первоначально заданных оказываются в среднем минимальными.

Модель технической ткани [21—27] (рис. 27—34). Одной из наименее разработанных задач, связанных с расчетом мягких оболочек, является точное численное описание свойств тканевых материалов с покрытиями (рис. 27). Решение этой задачи особенно важно в связи с применением все более жестких и прочных тканей (композиций типа «кевлар» и «майлор», стеклотканей с покрытием тефлоном и т. п.) и с требованием снижения веса конструкций

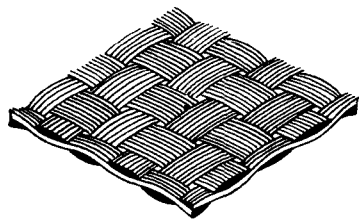


Рис. 27

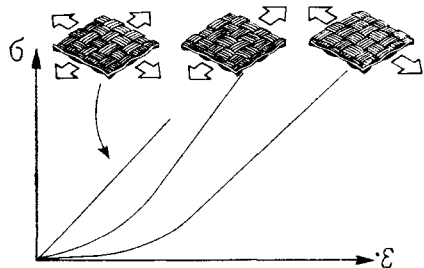


Рис. 28

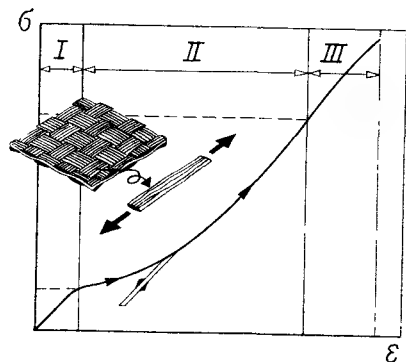


Рис. 29

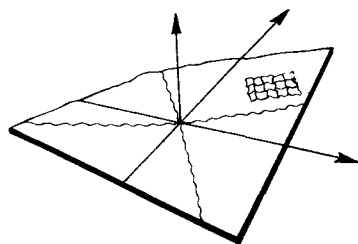


Рис. 30

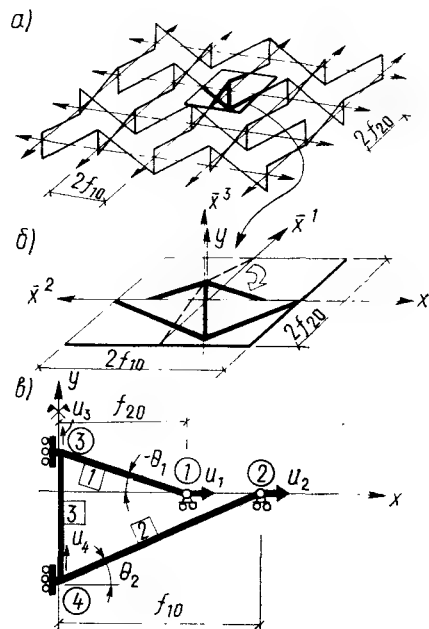


Рис. 31

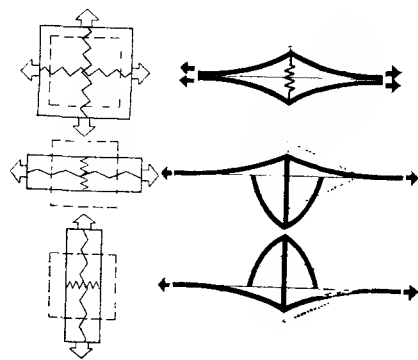


Рис. 32

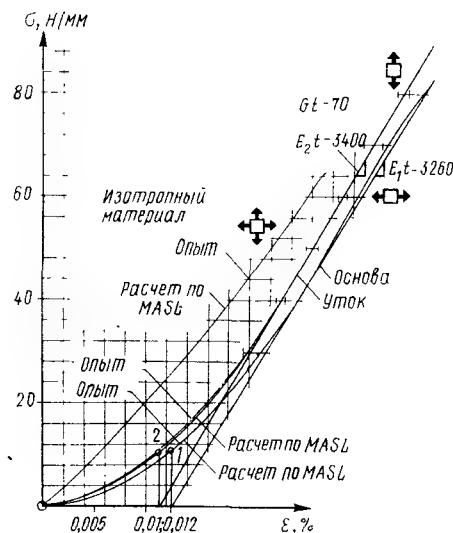


Рис. 33

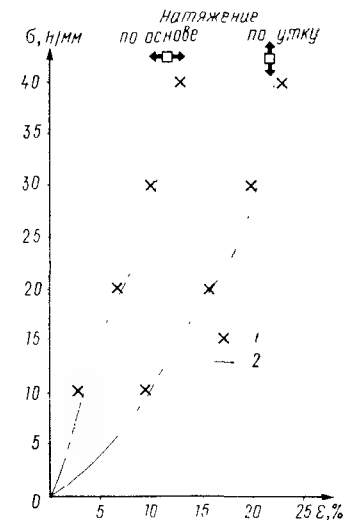


Рис. 34. Кривые «натяжение—удлинение»

1 — экспериментальные кривые, полученные фирмой Зоднак; 2 — кривые, полученные по программе РАМ — LISA

при одновременном повышении уровня действующих в них напряжений. Поэтому ниже подробно рассмотрена наглядная техническая модель тканевого материала с покрытием, которая может быть также использована в качестве основы для построения более совершенных моделей, отличающаяся простотой концепции и удачной формой прямого описания достаточно сложного объекта.

На микрофотографиях образца типичной ткани полотняного переплетения с покрытием можно увидеть начальное волнообразное искривление нитей ос-

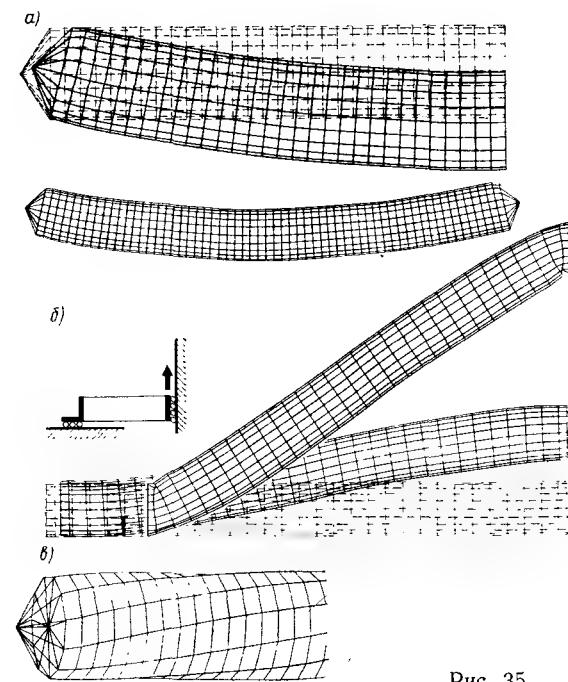


Рис. 35

новы и утка и их постепенное выпрямление при растяжении образца. Первоначальное сопротивление образца растяжению обусловлено хотя и малой, но сказывающейся при столь небольших расстояниях изгибной жесткостью нагруженных нитей и нитей перпендикулярного направления, кривизна которых при нагружении образца возрастает. Эффективная изгибная жесткость нитей еще увеличивается благодаря наличию полимерного покрытия, в массе которого они заключены.

В силу сказанного диаграммы «напряжение — деформация» при одноосном растяжении ткани (рис. 28) заметно нелинейны, причем в начальной стадии нагружения, когда происходит выпрямление нагруженных волокон, сопротивление ткани невелико, а в дальнейшем ее жесткость и сопротивление возрастают, поскольку эти волокна уже полностью вытянуты. Таким образом, кинематическое взаимодействие нитей основы и утка обуславливает начальную нелинейность деформирования ткани, даже если материал волокон предполагается линейно-упругим или нерастяжимым.

Другая основная причина нелинейности деформирования ткани заключается в нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями, характерной для некоторых типов волокон, из которых изготовлены нити ткани (рис. 29). Например, полиэфирные волокна имеют значительную жесткость при малых деформациях, затем их жесткость резко снижается и вновь возрастает при высоких деформациях.

Оба фактора, обуславливающих нелинейный характер деформаций ткани с покрытием, могут быть достаточно просто учтены в расчете, если использовать для численного описания одноосной и двухосной деформации материала *нелинейную стержневую модель*, соответствующую типичному многократно повторяющемуся узлу пересечения нитей основы и утка. Эта модель использована для автоматического определения параметров мембранных конечных элементов в рамках машинной программы расчета RAM — LISA (рис. 30).

В точках сопряжения конечных элементов нити основы и утка заменяются нелинейными стержневыми элементами с начальными искривлениями, соответствующими начальным искривлениям нитей (рис. 31). В узел пересечения нитей вводится короткий стержневой элемент, расположенный перпендикулярно срединной поверхности ткани; таким образом фиксируется расстояние между стержнями, моделирующими пересекающиеся нити, и обеспечивается их кинематическое взаимодействие (рис. 32). Сдвиговая жесткость ткани с покрытием, определяемая в основном малым по величине сопротивлением сдвигу материала покрытия, моделируется в расчете непосредственно введением ортотропных напряжений сдвига в плоскости мембраны, задаваемых как характеристики материала.

В машинной программе расчета описанная модель используется путем замены сплошного материала мембраны структурой, состоящей из соединенных между собой нелинейных стержневых элементов (рис. 31, в). При этом реакция мембранного элемента, на-

пример, на приложенные к нему деформации определяется в результате последовательных итераций из условия равновесия всех узлов стержневой модели.

Отдельные нелинейные стержневые элементы в описанной модели могут характеризоваться линейными или нелинейными свойствами материала. В простейшем случае можно принять, что материал деформируется линейно-упруго при изгибе и при осевом растяжении. Стержневые элементы можно также приписать свойство нелинейной растяжимости в осевом направлении, характеризуемой криволинейной диаграммой «напряжение — деформация», в том числе и с линейной разгрузкой (рис. 29), что соответствует линейному или нелинейному поведению отдельных типов волокон. Далее, поперечные стержневые элементы, которые фиксируют расстояние между стержнями, моделирующими нити основы и утка, могут обладать продольной упругостью, что позволяет моделировать упругие контактные деформации нитей в местах их пересечения при двухосном натяжении ткани. Наделяя поперечные стержни упруго-пластическими свойствами, можно частично воспроизвести эффект остаточного поперечного обжатия, характерный для большинства технических тканей, особенно на первых циклах истории нагружения.

Описанная модель, очевидно, может быть еще уточнена с учетом вязкоупругих свойств (ползучести) материала и т. д., но и в существующем виде она оказалась исключительно полезной при решении весьма ответственных практических задач. На рис. 33 и 34 приведены кривые «напряжение — деформация» для некоторых технических тканей, полученные опытным путем и рассчитанные с использованием описанной модели; сравнение этих кривых свидетельствует о высокой точности модельного описания свойств материала. Параметры стержневой модели (ее геометрия, осевые и изгибные жесткости стержней) могут быть разумным образом рассчитаны из условия наилучшего приближения к опытным кривым (такой расчет быстро сходится после нескольких попыток), причем геометрические параметры стержневой модели можно определить и непосредственно по геометрии переплетения ткани.

Пневмобалки [28] (рис. 35—36). По программе RAM — LISA был произведен расчет пневмобалки с отношением диаметра сечения к длине 1 : 10 для простейших видов нагружения, давший хорошую сходимость с результатами лабораторных испытаний на модели. Было рассмотрено четыре вида нагружения — внутреннее избыточное давление в сочетании с осевым сжатием, изгибом, поперечным сдвигом и кручением. Вследствие значительных перемещений и деформаций пневмобалки результаты расчета для трех последних видов нагружения различались в зависимости от того, имела или отсутствовала свободная деформация балки в осевом направлении. На рис. 35 в масштабе показаны деформированные состояния конечно-элементной модели пневмобалки при «чистом» изгибе (рис. 35, а), поперечном сдвиге (рис. 35, б) и кручении (рис. 35, в). На рис. 36 видно хорошее совпадение расчетных и экспери-

ментальных результатов при «чистом» изгибе балки. Более широкая петля гистерезиса, полученная при лабораторных испытаниях, связана с трением в опорных узлах, которое не учитывалось в расчете.

Для расчета на ЭВМ использовали модель, состоящую примерно из 300 мембранных элементов. Модельные пневмобалки были изготовлены из коммерческой полиамидной ткани с неопреновым покрытием. Возможность местной потери устойчивости (складкообразования) оболочки пневмобалки вблизи ее торцов автоматически учитывалась программой расчета, причем места появления складок можно наблюдать на деформированной сетке конечных элементов, как показано на рис. 35, б. Однако геометрическая форма складок при этом не всегда воспроизводится, поскольку складка может локализоваться в пределах одного конечного элемента, который, по определению, не воспринимает сжимающих усилий в любом направлении.

Аэростат «Венера» [22] (рис. 37). Французским Национальным центром космических исследований были проведены опытные работы по проектированию газонаполненного аэростата, предназначенного для спуска в атмосферу планеты Венера. Аэростат представляет собой сферу диаметром около 9 м и объемом около 400 м³ с тонкой легкой оболочкой сложной структуры, состоящей из высокопрочной ткани с многослойным покрытием, которое включает отражающие и защитные слои. Для расчета оболочки была использована программа PAM — LISA.

В соответствии с программой совместных советско-французских космических исследований аэростат должен быть изготовлен во Франции и доставлен советским космическим кораблем на орбиту, описываемую вокруг Венеры. При отделении от корабля-носителя аэростат должен быть заполнен газом под давлением около 50 мбар (5 кПа), чтобы на орбите нести научное оборудование массой около 250 кг. Общая масса аэростата с грузом составляет около 370 кг, из них масса оболочки — около 75 кг. Градиент избыточного давления газа в оболочке и давления в атмосфере Венеры на расчетной высоте орбиты составляет около $8 \cdot 10^{-9}$ Н/мм², что обеспечивает подъемную силу, необходимую, чтобы уравновесить силу тяжести при расчетной массе аэростата с грузом, создаваемую притяжением Венеры на высоте орбиты.

Оболочка аэростата (см. рис. 37, а) выполнена из 32 одинаковых сегментов меридиональной разрезки, соединенных наклеенными на них полосами ткани шириной 5 см, которые проходят от одного полюса оболочки к другому. Эти полосы изготовлены из того же материала, что и оболочка, но с таким расчетом, чтобы они не упрочняли оболочку в меридиональном направлении. Высокопрочная ткань оболочки (из волокна типа «кевлар», «майлар» и т. п.) выполнена таким образом, что ее нормальные характеристики (диаграммы деформирования при одноосном растяжении) в направлении основы и утка (см. рис. 33) почти не отличаются, т. е. ткань имеет практически одинаковую деформативность и прочность в

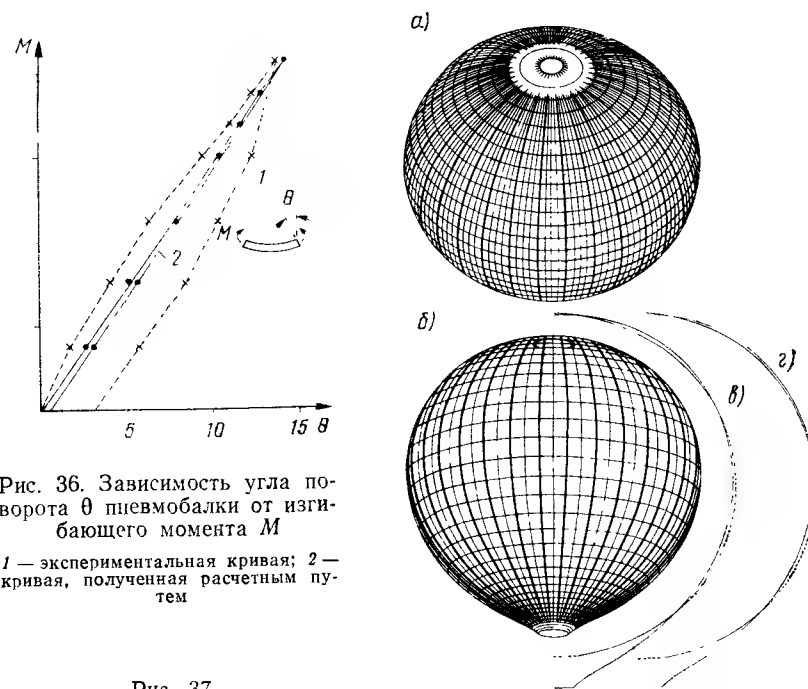


Рис. 36. Зависимость угла поворота θ пневмобалки от изгибающего момента M

1 — экспериментальная кривая; 2 — кривая, полученная расчетным путем

Рис. 37

двух взаимно перпендикулярных направлениях. Этого обычно не бывает у большинства коммерческих тканей, которые отличаются меньшей деформативностью в направлении основы, поскольку нити основы первоначально менее искривлены, чем уточные (см. рис. 34). На полюсах оболочки имеются жесткие металлические диски диаметром 0,7 и 1 м, служащие для крепления меридиональных сегментов оболочки.

В задачи расчета входило:

нахождение «чистой» формы оболочки, соответствующей напряженному состоянию равномерного растяжения;

построение реальной формы оболочки из материала с заданными характеристиками, соответствующего «чистой» форме с минимальными отклонениями от нее по геометрии и напряженному состоянию;

исследование напряженного состояния и деформаций оболочки при различных нагрузках.

При этом использована методика, изложенная в разделе «Методика проектирования мягких оболочек», за исключением этапа 3 (выбор схемы раскроя), поскольку заранее задан геодезический раскрой оболочки в виде меридиональных сегментов.

В силу симметрии каждого из 32 сегментов оболочки при расчете моделировался только один полусегмент; его конечно-элементная модель состоит из 732 мембранных элементов: 176 элементов по длине меридиана и 4—5 элементов по ширине полусегмента

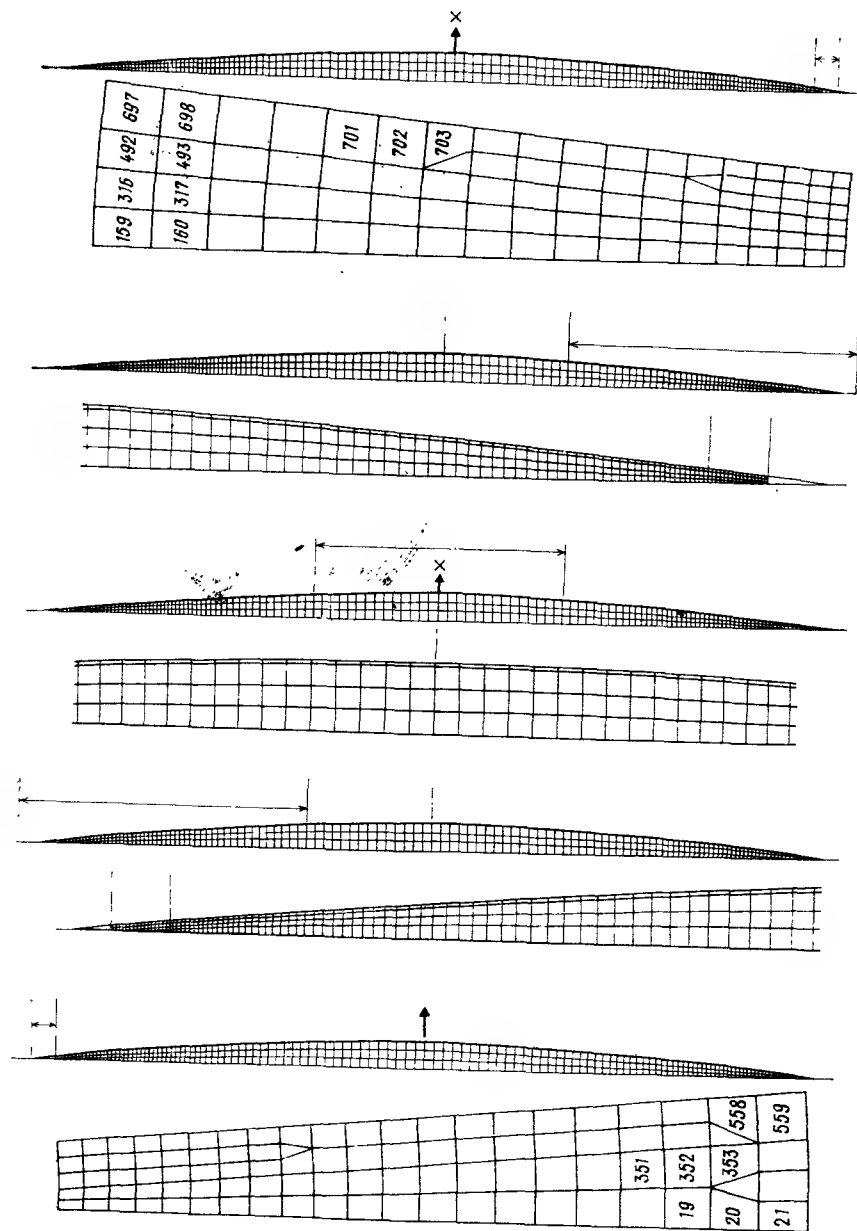


Рис. 38

(рис. 38). Металлические диски у полюсов оболочки моделировались жесткими конечными элементами.

На этапе 1 отыскивается «чистая» форма оболочки (т.е. форма эквивалентной мыльной пленки) при совместном действии внут-

реннего давления, линейно изменяющегося атмосферного давления, полезного груза и постоянной нагрузки от полярных дисков, из условия, чтобы объем аэростата (с учетом деформаций оболочки) был в точности равен объему, необходимому для плавания аэростата в атмосфере Венеры на строго определенной высоте. Эта «чистая» форма показана на рис. 37, б и в; суммарное значение растягивающих усилий в оболочке составляет около 10,8 Н/мм.

На этапе 2 по программе автоматически выполняется замена всех 732 пленочных элементов на соответствующие им по положению в пространстве элементы нелинейно-упругого тканевого материала с покрытием, имеющие заданное натяжение 10,8 Н/мм.

Таким образом, заменяющая мембрана имеет ту же форму и то же напряженное состояние, что и исходная «мыльная пленка». Такое соответствие, вообще говоря, не будет достигнуто, если не проводить расчет строго по этапам 1 и 2 разработанной методики. Например, на рис. 39 показаны боковой вид и разрез оболочки аэростата (в исходном состоянии) при раскрое ее просто по идеальной сферической поверхности; при наполнении газом оболочка увеличивается в размерах, а усилия от подвешенного полезного груза искажают ее напряженное состояние, как показано на рис. 40, б.

На этапе 4 осуществляется «разгрузка» оболочки, и элементы раскроя ткани, благодаря ее упругой релаксации, принимают форму сегментов двойной кривизны, свободных от напряжений. Далее в специальном блоке программы производится развертка этих сегментов на плоскость (этап 5). При этом в материале оболочки возникают минимальные «паразитические» внутренние напряжения, не превышающие $\pm 30\%$ расчетного напряжения, равного 10,8 Н/мм; наибольшего значения они достигают в меридиональном направлении, вблизи экватора оболочки. Эти «паразитические» напряжения связаны с упругим деформированием сегментов двойной кривизны при их развертывании на плоскость, причем значения напряжений зависят от размеров элементов раскроя и от деформативности ткани. Окончательный раскрой оболочки получают на этапе 6 в виде набора плоских сегментов материала, очертание которых в ненапряженном состоянии строго соответствует очертанию развертки сегментов оболочки на плоскость.

Заключительный блок программы расчета (этап 7) предусматривает соединение элементов окончательного раскроя оболочки между собой и приложение к ним начального внутреннего давления, а также всех нагрузок, ранее учтенных при нахождении «чистой» формы оболочки (наделенной свойствами мыльной пленки). При нагружении первоначально плоские элементы раскроя принимают форму сегментов двойной кривизны, в связи с чем в оболочке появляются неизбежные, но минимальные «паразитические» напряжения, достигающие $\pm 30\%$ среднего значения расчетного равномерного натяжения оболочки, равного примерно 10,8 Н/мм. Наибольшие «паразитические» напряжения развиваются вблизи экватора оболочки. Реальная форма оболочки, рассчитанная по описанной методике, незначительно отличается от исходной «чистой»

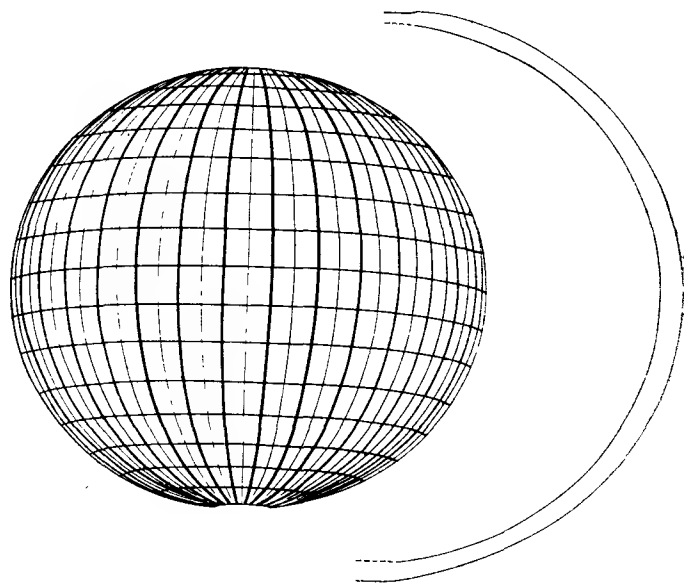


Рис. 39

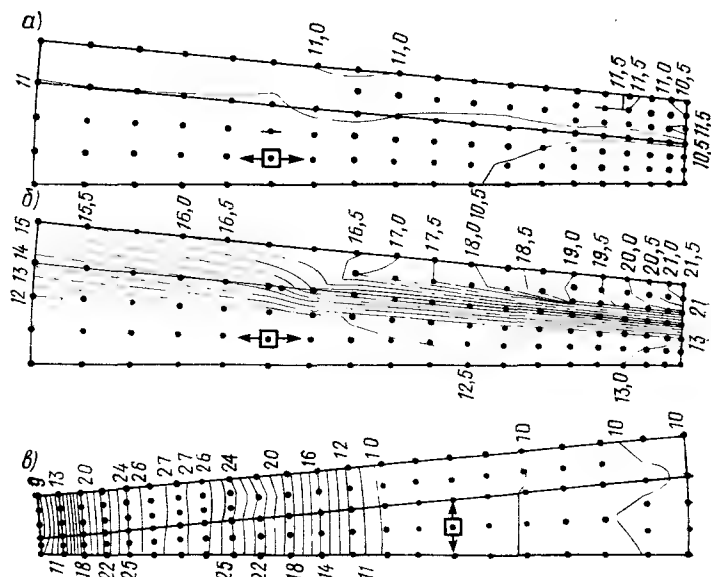


Рис. 40

формы, что видно на поперечном разрезе оболочки (см. рис. 37, г).

Эффективность разработанной методики проектирования пневмооболочек иллюстрируется картинками изостат меридиональных натяжений вблизи нижнего полюса оболочки аэростата при ее рас-

крое соответственно строго по разработанной программе (см. рис. 40, а) и просто по сферической поверхности (см. рис. 40, б). При «сферическом» раскрое меридиональные натяжения достигают значения 21,5 Н/мм, тогда как в правильно запроектированной оболочке эти натяжения оказываются весьма близкими к расчетному значению, равному 10,8 Н/мм.

Специально было исследовано напряженное состояние оболочки аэростата при возможных систематических отклонениях по ширине элементов раскроя. Для этого были заданы отклонения от номинальной ширины в форме синусоиды с амплитудой 0,3 мм и длиной волны около 200 мм при их наиболее неблагоприятном расположении (вблизи верхнего полюса оболочки). В результате максимальные упругие натяжения в кольцевом направлении достигали 27 Н/мм (см. рис. 40, в), т. е. значительно превосходили расчетное значение натяжения, равное 10,8 Н/мм. Отсюда следует, что при использовании современных жестких и высокопрочных тканей особое важное значение имеет обеспечение высокой точности расчета и исполнения раскроя оболочки.

Заключение. В настоящей статье предпринята попытка показать подход к проектированию и расчету пневматических конструкций на основе применения современных численных методов. Используемая для этих целей программа ПАМ—LISA позволяет полностью осуществить проектирование легких конструкций, начиная с нахождения формы оболочки, обладающей свойствами мыльной пленки, до построения точного раскроя оболочки и расчета усилий в ней от действующих нагрузок. Особое внимание уделено общей методике проектирования мягких оболочек (мембран), обеспечивающей получение оптимальных конструктивных решений и представляющей собой универсальное рациональное средство для решения исключительно сложной задачи раскроя оболочек. Доступность и эффективность разработанной методики продемонстрированы на двух примерах из областей промышленной и космической техники.

Следует полагать, что предлагаемая методика является как раз тем необходимым звеном, которое может обеспечить решение проблемы рационального, эффективного и широкого применения современных высокотехнологичных материалов при инженерном и архитектурном проектировании долговечных пневматических и тентовых конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otto F., Schleyer F. K. Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 2, Ullstein Fachverlag, Berlin, 1966.
2. Ishii K. On developing of curved surfaces of pneumatic structures. IASS International Symposium on Pneumatic Structures, Department of Architecture, Delft University of Technology, Delft, 1972.
3. Haug E., Powell, G. H. Finite Element Analysis of Nonlinear Membrane Structures, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, California 1972.

4. Haug E. Berechnung von Seilfachwerken. IL Bericht 1/70, Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart, 1970.
5. Haug E. Berechnung von Seilnetzen. Teil 2. A priori Netze, IL Bericht 33/70, Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart, 1970.
6. Haug E. Berechnung von Seilnetzen. Teil 3. A Method to define the Stress—Free Configuration of Prestressed Cable Nets. IL—Bericht 35/70, Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart, 1970.
7. Haug E. Formermittlung von Netzen. Die Bautechnik, Heft 9, 1971, S. 294—299.
8. Haug E., Powell G. H. Analytical Shape Finding for Cable Nets. IASS Pacific Symposium—Part II on Tension Structures and Space Frame, Tokyo, October 1971.
9. Haug E., Powell G. H. Finite Element Analysis of Nonlinear Membrane Structures. IASS Pacific Symposium—Part II on Tension Structures and Space Frames, Tokyo, October 1971.
10. Haug E. Finite Element Analysis of Pneumatic Structures. IASS International Symposium on Pneumatic Structures, Department of Architecture, Delft University of Technology, Delft, 1972.
11. Haug E., Oelbermann J. Numerical Design and Analysis on Air Supported Structures IASS International Symposium on Air Supported Structures, Venice, 1977.
12. Haug E., Oelbermann J. Numerische Ermittlung von Minimalflächen, Symposium Minimalstrukturen, Essen, March 1977. R. Müller, Köln—Braunsfeld.
13. Oelbermann J., Haug E. Berechnung des Zuschnitts einer Membrane mit Hilfe der Finiten Element Methode; 2nd International Symposium Weitgespannte Flächentragwerke, University of Stuttgart, May 14—18, 1979.
14. Oden J. T., Bathe K. J. A Commentary on Computational Mechanics, Applied Mechanics Reviews, Vol. 31, No. 8, August 1978.
15. Roache P. J. Computational Fluid Dynamics (Introductory Chapter), Hermosa Publishers, Albuquerque, N. M., 87108, 1976.
16. Wilson E. L. Automated Analysis and Design of Complex Structures, Paper M1/1, 4th SMIRT Conference, San Francisco, 1977.
17. Duddeck H. Zu den Berechnungsmodellen der Technik. Die Bautechnik, Heft 10, October 1976.
18. Schwenkel D. Mathematisch numerische Methoden zur Approximation und Abbildung der Systemgeometrie weitgespannter Flächentragwerke. Dissertation, IAGB Universität Stuttgart, 1977, DGK, Reihe C, Nr. 243 und SFB 64 Mitteilungen 46/78.
19. Brinkmann G. Statische Berechnung von gleichmaschigen Netzen und Membranen auf speziellen Flächen mit Hilfe der Vectoranalysis, SFB 64-Mitteilungen 42/76.
20. Haug E. Engineering Contributions to the Design of Lightweight Structures via Numerical Experiments, 2nd International Symposium Weitgespannte Flächentragwerke, University of Stuttgart, Vol. 2, May 1979.
21. Haug E. Program PAM—LISA, user's and theoretical manual, Engineering System International, 20 rue Saarinen, 94578 RUNGIS CEDEX, France, September 1980.
22. Haug E., Winkelmüller G. Optimisation Numérique de la Forme du Ballon Venus, Rapport EE 79—641, Engineering System International, 20 rue Saarinen, 94578 RUNGIS CEDEX, France, June 1980.
23. Kawaguchi Y. et al. Engineering Problems of Pneumatic Structures, paper 5—6 of the IASS Pacific Symposium—Part II on Tension Structures and Space Frames, Tokyo, 1971.
24. Shimamura S. and Takeuchi O. Mechanical Behaviour of Selected Coated Fabrics used in Membrane Structures in Japan, paper 6—1 of the IASS Pacific Symposium—Part II on Tension Structures and Space Frames, Tokyo 1971.
25. Losch M. H. Bestimmung der Mechanischen Konstanten für einen zweidimensionalen, nichtlinearen, anisotropen, elastischen Stoff am Beispiel beschichteter Gewebe, Dissertation University of Stuttgart, Prof. U. Wegner, University of Stuttgart, 1971.

26. Reinhardt H. W. Ein und zweiachsige Verformungen und Festigkeitsuntersuchungen an einem beschichteten Gittergewebe, Mitteilungen 31/1975, Sonderforschungsbereich SFB 64, Otto-Graf-Institut, University of Stuttgart, 1975.
27. Meffert B. Mechanische Eigenschaften PVC—beschichteter Polyestergerewebe, Institut für Kunststoff-verarbeitung (IKV), Technische Hochschule Aachen, Pontstr. 49, 5100 Aachen, Mai 1978.
28. Haug E., Winkelmüller G., Curnier A., de Rouvray A. ESI-Internal Report, Engineering System International, 20 rue Saarinen, 94578 Rungis Cedex, France, October 1980.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ В РЕЖИМЕ ДИАЛОГА «ЧЕЛОВЕК — МАШИНА»

М. Майовецки, Дж. Тирони (Италия)

Общие положения. За последние десять лет отмечается широкое распространение пневматических конструкций, применяемых в качестве укрытий спортивных и промышленных комплексов. Однако это не всегда сопровождается соответствующим развитием методов проектирования и испытания конструкций. Например, геометрические формы покрытий не всегда бывают оптимальными для конструкций, поддерживаемых внутренним давлением.

Геометрические формы, наиболее часто используемые конструкторами, в основном назначают эмпирически, начиная с цилиндров, сфер и их возможных комбинаций [1]. Таким путем приходят к поверхностям, в которых после приложения внутреннего давления выявляются участки концентрации напряжений и образования морщин материала, не обладающего способностью воспринимать сжимающие усилия. На этих участках локальные кривизны геометрической поверхности, определенной эмпирическим путем, не удовлетворяют условию

$$n_{\min} = \frac{1}{2} (n_x + n_y \pm \sqrt{(n_x - n_y)^2 + 4t^2}) > 0,$$

которое гарантирует наличие растягивающих усилий по всей поверхности пневматической конструкции [2].

Цель этой статьи — содействовать индивидуализации конструктивных геометрических форм, пригодных для пневматических конструкций.

Предварительный процесс привязки геометрии к сооружению заключается в изготовлении моделей, но, поскольку для такого проектирования требуется множество попыток, изготовление моделей связано со значительными и иногда неприемлемыми затратами времени и средств. Кроме того, модель может дать только визуальное представление о будущем сооружении без какой-либо гарантии, что его геометрическая форма будет соответствовать ста-

© М. Majowiecki, G. Tironi, 1983.

тической работе как в условиях предварительного напряжения, так и при различных воздействиях нагрузок.

В качестве единственно удобного и быстрого метода проектирования, как архитектурного, так и конструктивного, предлагается метод проектирования с помощью интерактивных, работающих в режиме диалога «человек — машина» программ. С помощью ЭВМ, снабженных графическим дисплеем, такие программы обеспечивают быстрое, визуальное и увлекательное проектирование.

Когда интерактивное проектирование закончено, можно получить путем проецирования геометрических данных на экран перспективы и некоторые проекции, а также провести необходимую их проверку.

Проектирование пневматических сооружений осуществляется с помощью интерактивных технических средств. Программное обеспечение (PNEUS), также интерактивное, разработано таким образом, чтобы обеспечить автоматическое получение сетки координат (PREPNE) и графического результата (PNEUS PLOT).

Поиск уравновешенной геометрической формы пневматической конструкции при внутреннем давлении

Формулировка задачи. Использование в континуальной модели мембраны уравнений равновесия бесконечно малого элемента связано с трудностями разрешения этих уравнений (проблема сходимости) и назначением граничных условий [2]. Чтобы избежать этих затруднений, рекомендуется прибегнуть к помощи математической модели, составленной из плоских элементов участка поверхности, уменьшенного в масштабе, которые собираются вместе, образуя поверхность пневматической конструкции, находящуюся в равновесии.

Элемент поверхности. Рассмотрим типичный узел $K (X_k, Y_k, Z_k)$, принадлежащий поверхности находящейся в равновесии мембраны, и исследуем треугольные элементы, имеющие своей вершиной точку K (рис. 1). Из этих элементов выделим элемент 1—2—3 (рис. 2), связанный с осями локальных координат. Предполагается, что напряженное состояние этого элемента фиксировано.

Рассматривая силы F_1, F_2, F_3 , которые статически эквивалентны зоне постоянных растягивающих напряжений, определяемой сторонами треугольника, имеем:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$[T] = \frac{2}{t} \begin{Bmatrix} l_{12}^2/h_3 & l_{23}^2/h_1 & l_{31}^2/h_2 \\ m_{12}^2/h_3 & m_{23}^2/h_1 & m_{31}^2/h_2 \\ l_{12} m_{12}/h_3 & l_{23} m_{23}/h_1 & l_{31} m_{31}/h_2 \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь t — толщина мембраны; h_1, h_2, h_3 — высоты треугольника, замеренные соответственно от вершин 1, 2, 3; l_{kj} и m_{kj} — направляющие косинусы стороны KJ .

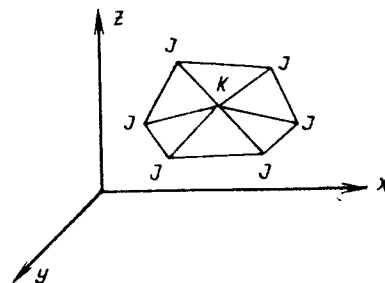


Рис. 1. Пневматическая конструкция разбита на треугольные элементы; K — произвольный узел с координатами X_k, Y_k, Z_k

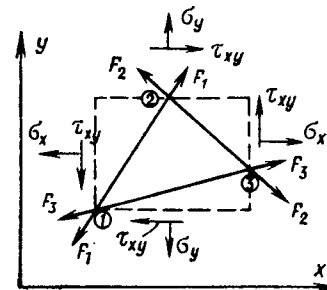


Рис. 2. Треугольный элемент 1—2—3, который подвергается действию нагрузок, направленных вдоль трех сторон

Поскольку предполагается, что напряжение постоянно, можно считать, что на узел K действуют нагрузки по эквивалентным воображаемым стержням, сходящимся в этом узле. Поэтому на стадии определения поверхности равновесия, где по самой природе не возникают упругие деформации, вместо действительной неразрывной конструкции можно представить себе элемент, состоящий из воображаемых узлов и стержней.

Полученная таким образом воображаемая эквивалентная конструкция представляет собой сетчатую поверхность, образованную стержнями, которыми являются смежные стороны маленьких треугольников [3].

Этот метод дает возможность, найдя силы F , вернуться с помощью уравнений (1) к определению основных напряжений в континуальном материале, из которого сделана оболочка.

Условия равновесия. При сборке всех элементов уравнение равновесия, с помощью которого решается данная задача, выражается в векторной форме следующим образом:

$$\sum_{j=1}^{NA} \bar{S}_{kj} = p \sum_{j=1}^{NA} \bar{n}_{kj}, \quad K = 1, N, \quad (3)$$

где N — число внутренних узлов; NA — число стержней, сходящихся в узле K ; p — внутреннее давление; $\bar{S}_{kj}$ — эквивалентные нагрузки, направленные вдоль сторон элементов и состоящие из сумм сил F двух смежных сторон; $\bar{n}$ — вектор нормали к поверхности элемента, имеющего вершину в узле K ; A_{kj} — площадь элемента с вершиной в узле K .

В компактной форме уравнение (1), отнесенное к глобальной системе координат, имеет вид:

$$[\bar{T}] \{S\} = \{P\}, \quad (4)$$

где $[\bar{T}]$ — матрица косинусов углов, образованных стержнями с осями координат.

Численное решение. Если заданы значения сил в воображаемых стержнях, можно решить систему нелинейных уравнений, где неизвестными являются координаты внутренних узлов сооружения.

Рассмотрим ситуацию, когда таким образом уже получены сле-

дующие численные величины: $P_{kj}^0 = (X_k; Y_k; Z_k)$ — координаты внутренних узлов; S_{kj}^0 — усилие в воображаемом стержне kj ; L_{kj} — длина этого стержня.

Этот первый результат нельзя считать удовлетворительным, в особенности применительно к пневматическому сооружению. Действительно, если решетка нанесена на прямоугольный контур, то высоты вблизи углов контура очень малы, и решение теряет практический интерес [4] (рис. 3).

Во избежание этого необходимо дополнительно к условиям равновесия ввести другие условия или ограничения, назначаемые для каждого конкретного объекта.

Задача, которую нужно решить, выглядит следующим образом:

а) необходимо найти новую поверхность, соответствующую положению равновесия, и для нее новые значения $P_k^F = (X_k^F, Y_k^F, Z_k^F)$;

б) на формулу этой поверхности наложен ряд ограничений: заранее определенные величины L_{ki}^F (нелинейные ограничения);

заранее определенные величины S_{kj}^F (линейные ограничения);

заранее определенные величины X_k^F, Y_k^F, Z_k^F (линейные ограничения);

в) выбор из бесконечного числа поверхностей, которые могут быть получены при таких ограничениях, будет обусловлен целевой функцией. Будучи в большинстве случаев нелинейной, эта функция должна позволить найти поверхность, как можно более близкую к поверхности, задуманной проектировщиком, но с учетом ограничений.

Отсюда вытекает идея решения рассматриваемой задачи с помощью метода автоматической оптимизации.

Таким образом, имеются:

переменные величины X^F, Y^F, Z^F, S^F ;

ограничения $g(X^F, Y^F, Z^F, S^F) = 0$ при $S > 0$;

целевая функция

$$F = \sum_k^n C_1 [(X_k^F - X_k^0)^2 + (Y_k^F - Y_k^0)^2 + (Z_k^F - Z_k^0)^2] + \sum_{ki}^m C_2 (S_{ki}^F - S_{ki}^0) \rightarrow \text{minimum}.$$

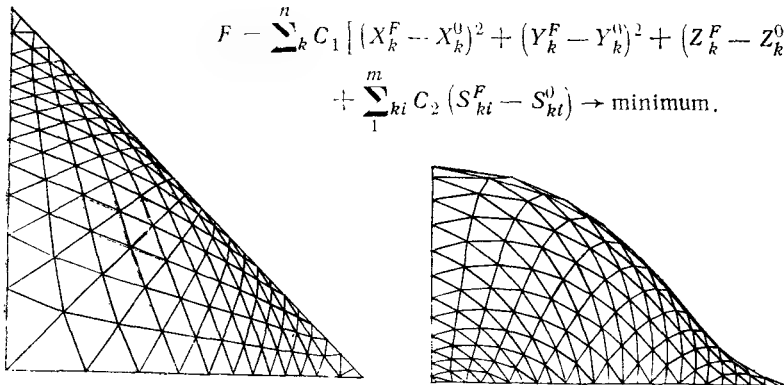


Рис. 3

Здесь C_1 и C_2 являются весовыми коэффициентами; они дают пропорциональный вес при необходимости получить особое решение, в котором преобладают условия геометрии и напряжения.

Ограничения представлены условиями равновесия (4). Число этих условий равно $3n$, где n — число внутренних узлов.

Могут быть заданы другие, дополнительные ограничения, например:

условия нагружения

$$S_{ki}^F = \text{const}; \quad (5)$$

условия постоянной длины

$$L_{ki}^F = \text{const}, \quad (6)$$

где

$$L_{ki}^F = \sqrt{\Delta^F X_{ki}^2 + \Delta^F Y_{ki}^2 + \Delta^F Z_{ki}^2}. \quad (7)$$

Эти условия оказываются очень существенными для конструкций, к которым предъявляются строгие требования, связанные с внутренним объемом и полезной высотой.

Целевая функция должна сводить к минимуму отклонение допустимой пневматической поверхности равновесия (F) и поверхности, выбранной при предварительном решении (0).

В заключение следует найти $3n + m$ неизвестных величин: $3n$ координат узлов K и m усилий в стержнях kj .

Деформированное и напряженное состояние пневматических конструкций. При проектировании пневматических конструкций помимо основной проблемы определения формы [2], что типично для всех мембранных покрытий, в высшей степени важно определить деформации от временных нагрузок, таких, как ветер и снег. Учитывая, что функционирование пневматических сооружений требует непрерывного потребления электроэнергии, необходимо установить соотношение между внутренним давлением в оболочке и характерной или действительной интенсивностью случайных нагрузок для контроля перемещения оболочки. Это нужно по двум причинам:

1) чтобы гарантировать достаточный коэффициент запаса, прежде чем будет достигнуто предельное состояние по условиям эксплуатации (по чрезмерным деформациям, когда, например, возможны разрывы материала, если он касается каких-либо объектов, находящихся внутри оболочки);

2) чтобы обеспечить правильное и, следовательно, экономичное функционирование конструкции при предельно низком внутреннем давлении, учитывая действительные значения временных нагрузок.

Последствия воздействия внешних нагрузок на систему приводят к необходимости определить, пусть даже волевым путем, распределение и интенсивность внешних силовых факторов и создать простой аппарат для расчета, с помощью которого при заданных нагрузках можно найти деформированную форму сооружения при больших деформациях.

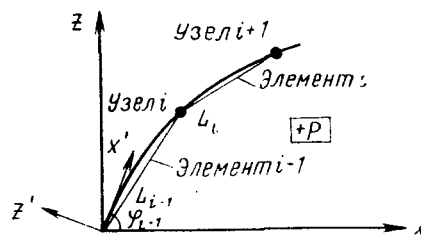


Рис. 4

Что касается первого аспекта, то влияние снеговой нагрузки можно оценить приближенно, на основе средней интенсивности и ее возможного распределения, в то время как аналогичные показатели для ветровых нагрузок определить гораздо труднее.

В самом деле, чтобы оценить распределение давления, создаваемого потоком воздуха, который обтекает сооружение, приходится

сталкиваться с очень сложными проблемами, связанными с динамическим поведением сооружений.

Однако недавние исследования [5] динамической работы пневматических сооружений, выполненные в аэродинамических трубах на моделях в форме длинных цилиндров (отношение максимального и минимального размеров в плане равно двум), указывают на возможность сравнительно простой схематизации явления.

Действительно, если рассматривать перемещения, то можно заметить, что динамические эффекты не имеют большого значения, если сравнивать их с величинами, которые определяются путем квазистатических расчетов, основанных на максимальной скорости ветра, особенно при высоком внутреннем давлении. Что же касается напряжений, то теоретические предположения, основанные на измерениях давления ветра, выполненных на жесткой модели, оказались, судя по результатам эксперимента, достаточно правильными. То же самое наблюдалось, когда имитировалась скорость ветра 30 м/с при внутреннем давлении, равном 180 Па.

На основе этих экспериментальных данных квазистатические расчеты, относящиеся к распределению коэффициентов среднего давления, можно считать достоверными.

Хотя эта проблема еще изучается, при рассмотрении некоторых задач деформации мы все же будем ссылаться на вышеупомянутые данные.

Определение плоского деформированного состояния. Предлагаемый метод решения. Дискретное решение системы уравнений, описывающих условие равновесия узловых точек сетки, может быть получено итеративным путем. При этом перемещения узлов принимаются за неизвестные величины [6, 11].

Действительно, учитывая деформативность мембраны и пренебрегая достаточно малыми величинами, мы можем написать следующие уравнения равновесия для характерного узла системы (рис. 4):

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_{i-1}}{L_{i-1}^0 + \Delta L_{i-1}} \Delta x_{i,i-1} + \frac{S_i}{L_i^0 + \Delta L_i} \Delta x_{i,i+1} &= P_{x,i}; \\ \frac{S_{i-1}}{L_{i-1}^0 + \Delta L_{i-1}} \Delta z_{i,i-1} + \frac{S_i}{L_i^0 + \Delta L_i} \Delta z_{i,i+1} &= P_{z,i}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\Delta x_{i,i-1} = x_i - x_{i-1}$; $\Delta z_{i,i-1} = z_i - z_{i-1}$ и т. д.; x_i и z_i — координаты узла i ; L_i^0 — начальная длина элемента i ; $\Delta L_i = (S_i - S_i^0) L_i^0 / (EA_i)$ — упругая деформация элемента i ; S_i , (S_i^0) — конечное (начальное) усилие в элементе i ; $P_{x,i}$, $(P_{z,i})$ — компонента нагрузки на узел i , дополнительное воздействие от усилий, воспринимаемых элементами $i-1$; она положительна, если ее направление совпадает с возрастанием $x(z)$.

При заданных геометрических условиях, соответствующих пневматическому сооружению (например, задаваясь координатами x и/или z некоторых узлов), и пренебрегая собственным весом мембраны, можно получить проектные значения внутреннего давления и напряжений мембранных конструкций (постоянных на нестесненных участках мембраны) и длины элементов L_i^0 .

Первое решение системы уравнений (8) дает форму сооружения; при этом внутреннее давление считается определяющей нагрузкой [2].

При использовании быстродействующих ЭВМ такой метод решения оказывается исключительно простым; кроме того, он позволяет записывать уравнение, не занимая широких секторов оперативных систем.

Более того, необходимо отметить, что при таком подходе легко организовать полный цикл интерактивного автоматизированного проектирования. Действительно, на первой стадии изучения с помощью видеодисплея можно исследовать форму конструкции, оптимизируя ее до достижения функциональных целей [2] (см. примеры, приведенные в конце статьи).

Решение нелинейной системы может быть легко получено методом итерации при условиях, что на каждом ее шаге коэффициенты уравнений, относящиеся к геометрической форме мембраны и характеристикам деформативности материала, будут изменены и что нагрузка будет соответствовать геометрическим изменениям сооружения, а при действии ветра — изменениям аэродинамических коэффициентов, даже если они получены из эпюр распределения давления, определенных для жестких конструкций.

Задача разделяется на две фазы:

1) неупругая фаза, в которой кинетические перемещения определяются исходя из равновесия совокупности нерастяжимых стержней ($L^F - L^0 = 0$);

2) упругая фаза, в которой учитывается влияние упругости материала. Деформированная форма близка к той, которая определена в первой фазе, что обеспечивает сходимость результатов численного расчета.

Эти фазы были приняты также для пневматических конструкций, геометрические схемы которых не могут быть сведены к плоскостным, поэтому описанный выше принцип проектирования будет обобщен и более подробно изложен далее.

Определение деформированного состояния пространственных пневматических конструкций. При расчете перемещений и напряжений при различных внешних нагрузках, преимущественно от воздействия ветра и снега, для получения начального решения был

принят метод, при котором упругие свойства материала не учитываются. Дело в том, что в рассматриваемой задаче перемещения велики, в то время как упругие и остаточные деформации материала малы.

Если рассматривать действия временных нагрузок, используя при этом нелинейные уравнения равновесия при больших перемещениях, можно столкнуться с проблемами неустойчивости численного решения и получить результаты, порой неожиданные и неудовлетворительные в отношении равновесия конструкции и непрерывности ее геометрической формы.

Может оказаться, что воздействие этих нагрузок вызывает только незначительные изменения деформаций, которыми можно пренебречь в начальной стадии, когда надо установить состояние напряжений и перемещений. В результате проблемы выглядит следующим образом: необходимо при разных нагрузках сохранять неизменными длины стержней решетки, изображающей очертания пневматического сооружения.

Используя процедуру численного решения, изложенную выше, и принимая во внимание условия (6), относящиеся к длинам стержней в начальном состоянии, можно кинематически определить новое положение равновесия сооружения под нагрузкой. Очевидно, что стержни, в которых напряжения $S < 0$, автоматически опускаются при проверке на каждом шаге процедуры решения. После получения значений кинематических перемещений становится возможным продолжить анализ упругого состояния в соответствии с методом конечных элементов [7, 8].

Процесс вычисления в значительной степени сокращается за счет исключения при исследовании больших перемещений только упругих деформаций.

Метод эквивалентности для пневматических сооружений. Используя теорию эквивалентности [9], можно получить удовлетворительные результаты, обеспечив их наглядную интерпретацию и значительно сократив при этом затраты машинного времени. Метод эквивалентности дает решение плоской или трехмерной задачи теории упругости с помощью простых программ ЭВМ для расчета сооружений, выполненных из стержневых элементов.

При использовании метода эквивалентности исследование деформации и напряжения может быть сведено к той же схеме, которая была применена при исследовании формы сооружения (состояния «0»). Благодаря этому существенно упрощается программа ЭВМ.

Согласно принципу эквивалентности полную энергию $\int_V U_0 dV$ континуального тела принимают дискретной, чтобы получить выражение энергии деформации сооружения (эквивалентной модели), состоящего из шарнирных сочлененных стержней.

Определение механических свойств модели производят отождествлением потенциальных энергий реальной конструкции (U_0 и эквивалентной модели U'_0).

Предполагая, что элементарная эквивалентная модель достаточно мала для того, чтобы поле деформации было постоянным в дискретных элементах, и рассматривая задачу определения плоского напряженного состояния, можно выразить потенциальную энергию упругой континуальной конструкции следующим образом:

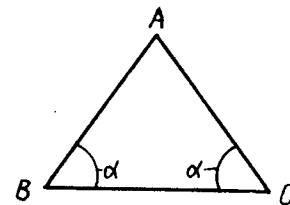


Рис. 5

$$U_0 = \frac{Et}{2(1-\nu^2)} [(e_{11})^2 + (e_{22})^2 + 2\nu e_{11} e_{22} + 2(1-\nu)(e_{12})^2], \quad (9)$$

где E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; t — толщина; e_{ij} — тензор деформации, равный

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i = 1; 2) \quad (j = 1; 2) \quad (10)$$

Энергия деформации шарнирного стержня AB выражается следующим образом:

$$W'_{AB} = \frac{1}{2} \rho_{AB} [e_{11} \cos^2 \alpha + e_{22} \sin^2 \alpha + 2e_{12} \sin \alpha \cos \alpha]^2, \quad (11)$$

где $\rho_{AB} = (EAL)_{AB}$; E — эквивалентный модуль упругости; A — эквивалентная площадь; α — угол между стержнем и осью x_1 при симметричном расположении.

Рассматриваемая треугольная модель показана на рис. 5, при этом $\alpha = \pi/3$;

$$\rho_{AB} = \rho_{AC} = \rho_{BC} = 8A\mu/3, \quad (12)$$

где A — объем, ограниченный треугольником ABC ; $\mu = E/[2(1+\nu)]$.

Выражение (11) справедливо для $\nu = 1/3$.

Необходимо обусловить, что треугольная сетка, подлежащая определению в состоянии «0», должна быть, как приведено выше, по возможности равносторонней. Механические свойства эквивалентной модели, определяемые главным образом на поверхности, оказываются вполне удовлетворительными, если учесть, что перемещение осуществляется по преимуществу за счет неупругой компоненты (см. пример в конце статьи).

Когда эквивалентная жесткость стержня решетки, эквивалентной модели пневматической конструкции, определена, матрица жесткости треугольного элемента может быть записана следующим образом:

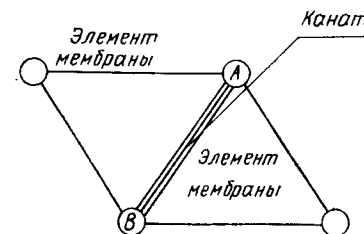


Рис. 6

$$[K_g + K_e] = \frac{AE}{l} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{S^0}{AE} + c_x^2 & c_x c_y & c_z c_x & -\frac{S^0}{AE} - c_x^2 & -c_x c_y & -c_z c_x \\ c_x c_y & \frac{S^0}{AE} + c_y^2 & c_z c_y & -c_x c_y & -\frac{S^0}{AE} - c_y^2 & -c_z c_y \\ c_z c_x & c_z c_y & \frac{S^0}{AE} + c_z^2 & -c_x c_z & -c_y c_z & -\frac{S^0}{AE} - c_z^2 \\ -\frac{S^0}{AE} - c_x^2 & -c_x c_y & -c_x c_z & \frac{S^0}{AE} + c_x^2 & c_y c_x & c_x c_z \\ -c_x c_y & -\frac{S^0}{AE} - c_y^2 & -c_z c_y & c_x c_y & \frac{S^0}{AE} + c_y^2 & c_z c_y \\ -c_z c_x & -c_z c_y & -\frac{S^0}{AE} - c_z^2 & c_x c_z & c_y c_z & \frac{S^0}{AE} + c_z^2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где S^0 — начальное усилие в состоянии «0»; c — направляющие косинусы типового стержня; K_g матрица геометрической формы элемента; K_e — матрица упругости элемента.

Решение может быть выполнено после сборки элементарных матриц обычным образом в соответствии с методом перемещений:

$$[K] \{\delta\} = \{P\}, \quad (14)$$

где $[K]$ — матрица, собранная в глобальной системе координат; $\{\delta\}$ — вектор перемещений; $\{P\}$ — вектор нагрузки.

Важно отметить, что при наличии канатных подкреплений включение их в матрицу жесткости легко обеспечивается простым добавлением. Действие, оказываемое на рядовой стержень AB смежными элементами и канатом, показано на рис. 6.

Теперь можно проанализировать «эквивалентную конструкцию» с учетом всех особенностей, связанных с рассмотрением больших перемещений. Такими особенностями являются геометрическая нелинейность, нелинейность материала и напряженное состояние одного знака (только $S > 0$).

Интерактивное проектирование. Режим диалога «человек — машина». При поиске поверхности мембранной оболочки значительную помощь проектированию оказывает графический вывод компьютера, позволяющий сразу же увидеть результат проведенных вычислений. Еще больших успехов можно достичь с помощью видеодисплея, который даст возможность немедленно получить наглядный вывод программы.

Преимущества такого устройства становятся особенно значительными, если структура программы обеспечивает двухстороннюю организацию процесса проектирования (т. е. если программа позволяет получать информацию и выдавать результаты).

Такая «двунаправленная» программа позволяет во время выполнения операции по обработке известных величин мгновенно прерывать расчет, вносить изменения в данные и возобновлять его, получая новые величины.

Чтобы с такой программой можно было работать, она должна допускать возможность ее ввода в интерактивный компьютер, который позволяет осуществлять внешние действия и вмешательство, когда это необходимо, в соответствии с обычным методом проб и ошибок при проектировании.

Таким образом, видеодисплей становится инструментом, расширяющим возможности проектировщика, в значительной степени повышая производительность и качество проектирования, а также давая возможность получения оптимального решения.

Технические средства и программное обеспечение интерактивного процесса проектирования. В обстановке современного развития сложной вычислительной техники и программного обеспечения, предназначенных для расчетов в области строительства, оптимальная взаимозависимость между человеком и машиной может быть, по-видимому, достигнута с помощью современной техники взаимодействия между проектировщиком и разработчиком электронной аппаратуры. Результатом такого сотрудничества являются компьютерные программы, условные наименования которых становятся все более известными, например CAD (проектирование с помощью компьютера), CAAD (архитектурное проектирование с помощью компьютера), CASD (инженерное проектирование с помощью компьютера), CAM (изготовление с помощью компьютера).

Созданные технические средства взаимодействия между человеком и машиной позволяют одновременно добиться следующих целей:

хорошей взаимосвязи на стадии анализа (действия, доверенные машине, при которых используются ее возможности, емкость запоминающего устройства и скорость автоматизированного расчета сооружений) и на стадии синтеза (действия, доверенные лицу, ответственному за контроль достоверности данных и критическую оценку результатов и порядка размеров; последнее достигается достоверностью приближенных методов расчета);

оптимизации проектирования путем использования средств взаимодействия как логического следствия диалогового режима проектирования (рис. 7). Этот режим допускает чрезвычайно простое и быстрое изменение данных и проверку их значения в соответствии с классическим методом проб и ошибок, основанным на опыте проектировщика, способного синтезировать массу данных, которую выразить в виде математической задачи трудно.

Интерактивный процесс проектирования осуществим благодаря

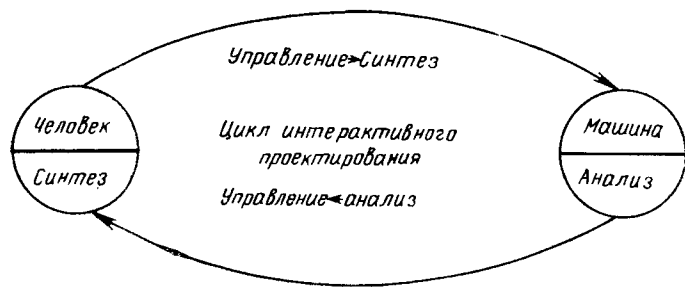


Рис. 7

взаимодействию интерактивных устройств (технических средств) и интерактивных конструктивных программ (программного обеспечения)—абсолютно новой технике такого рода по сравнению с традиционной, при которой оператор не вмешивается в работу ЭВМ, а довольствуется пассивной взаимосвязью между вводом данных и получением результатов.

Важность исследований в области создания интерактивных устройств и совершенствования программного обеспечения заключается в сокращении процедуры ввода—вывода при соответствующей предварительной обработке данных (пре-процессор) и последующем получении результатов (пост-процессор) (рис. 8).

Две эти фазы—предварительная и последующая обработка данных и результатов—достигаются с помощью соответствующих технических средств и программного обеспечения.

Предварительная обработка данных с помощью интерактивных технических средств может быть выполнена с применением следующих средств:

- буквенно-цифровой клавиатуры (технические средства);
- светопера (светового карандаша) и координатной ручки (технические средства);
- аналогового стола или аналого-цифрового преобразователя (технические средства);
- видеографа (технические средства);
- набора «световых кнопок» на экране дисплея и функциональной клавиатуры (программное обеспечение);
- программ для автоматической генерации данных (программное обеспечение).



Рис. 8

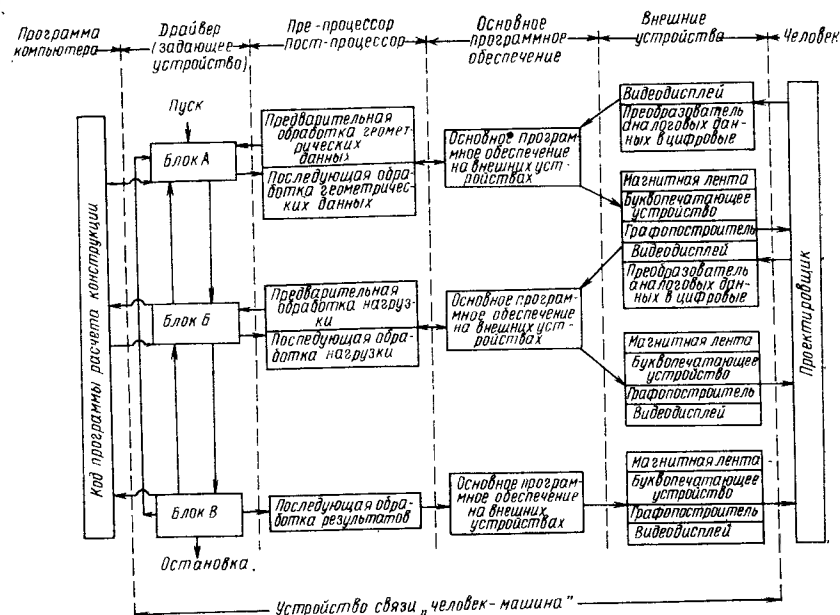


Рис. 9

Для дальнейшей обработки результатов используют следующие средства:

- видеограф (технические средства);
- графический стол или графопостроитель (технические средства);
- программы для графического представления результатов (программное обеспечение).

Разработанные в настоящее время языки для решения научно-технических задач, ориентированные на применение ЭВМ, в том числе и на новые поколения мощных мини-компьютеров, все более доступных по цене, позволяют обеспечить взаимодействие «человек—машина» в соответствии с интерактивной схемой, показанной на рис. 9.

По такой схеме взаимодействия (с сопряжением технических средств и программного обеспечения) общение между человеком и компьютером осуществляется на языке человека и позволяет обеспечить сбор числовых данных, символов и графиков, обычно используемых человеком в его профессиональной деятельности.

Связь графического типа, обеспечиваемая интерактивными техническими средствами (IG), является наиболее существенным фактором в области проектирования строительных конструкций.

Ввод данных осуществляется проектировщиком с помощью геометрических схем, которые могут быть переведены преобразователем аналоговых данных в цифровые. Данные, введенные таким образом, могут быть проконтролированы на экране. Другие дан-

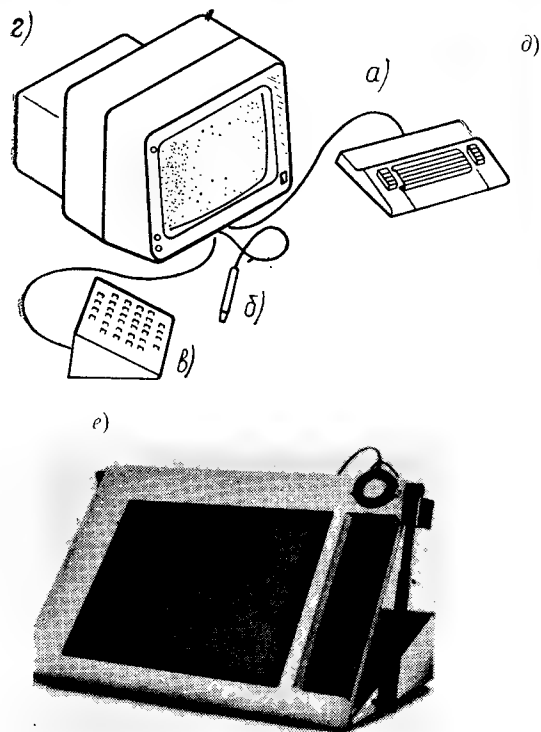


Рис. 10. Технические средства интерактивного процесса

а — буквенно-цифровая клавиатура; б — светоперо; в — функциональная клавиатура; г — видеодисплей; д — магнитное перо и скользящая линейка для преобразователя аналоговых данных в цифровые; е — преобразователь аналоговых данных в цифровые

ные, такие как механические свойства конструкции, могут быть введены с помощью буквенно-цифровой клавиатуры.

По окончании вычислений на видеоэкране или с помощью графопостроителя можно сразу же графически получить визуальную информацию о напряженно-деформированном состоянии конструкции.

Интерактивная графическая система может быть использована для проектирования, составления чертежей и проверки конструктивных деталей, она допускает внесение визуально контролируемых изменений и модификаций путем поворота и переноса изучаемой фигуры, а после получения решения обеспечивает при необходимости выдачу результатов на бумаге. Для реализации такой системы необходимо установить связь с программой, выполняемой соответствующими техническими устройствами. В процессе работы эти устройства прерывают программу, что позволяет вводить в определенном порядке новую информацию. Среди многих таких устройств наиболее простым является буквенно-цифровая клавиатура (рис. 10, а), напоминающая телетайп. Более сложные устройства включают в себя светоперья (рис. 10, б), координатные ручки (рис. 10, г), функциональные клавиатуры (рис. 10, в), командные устройства и аналоговые столы (рис. 10, е). Ниже вкратце приведены их характеристики.

С помощью буквенно-цифровой клавиатуры можно посылать в программу точные сообщения, но с не очень высокой скоростью, особенно если оператор не умеет быстро печатать.

Пожалуй, наиболее известным устройством является светоперо. Когда оно устанавливается на линии или на любом светящемся участке экрана и приводится в действие, положение пера посылается в компьютер. Координатная ручка действует по тому же принципу. Перемещение ручки вводит в ЭВМ две координаты положения.

Командные устройства представляют собой по существу вращающиеся потенциометры. Они главным образом используются для активации циклических повторений, трансляции и зонирования технических средств и программного обеспечения.

Все командные устройства являются аналоговыми, и сигнал преобразуется в числовую информацию с помощью аналого-числового преобразователя (А/Д).

Функциональные клавиатуры сконструированы из кнопок или переключателей, положение которых влияет на графическую программу.

Аналоговый стол — наиболее универсальное и точное из устройств, предназначенных для передачи информации в компьютер. Стол может выполнять все функции светопера, координатной ручки, функциональной клавиатуры и командных устройств. К столу присоединено перо или скользящая линейка (рис. 10, д), которые можно двигать по поверхности стола и с которых можно считывать их положение. В основном они имеют точность от $\pm 2,5$ до $0,025$ мм. Связь положения пера на столе и его положения на участке экрана осуществляется посредством скользящих линеек (видимый символ), движение которых на экране зависит от движения пера на столе.

Аналоговый стол имеет преимущество по сравнению со светопером. Когда стол используется для нанесения точек, их индикация производится из основного массива данных, а не из файла дисплея. Тем самым упрощается программа.

Интерактивное проектирование (программа PNEUS). Техника интерактивного расчета приобретает особое значение при проектировании пневматических сооружений. При рассмотрении блок-схемы программы PNEUS (рис. 11) можно выявить ряд преимуществ, в основном в отношении экономии времени и стоимости проектирования.

Основным элементом структуры интерактивной программы расчета является блок управления интерактивными командами.

Если вводится фиксированная информация (например, координаты точек анкеровки), которая может поступать из программы автоматической генерации, периферических запоминающих устройств или попросту считываться с перфокарт, и параметрические данные, служащие для активации последовательности обработки входной информации, то можно получить начальный результат на экране (блок А).

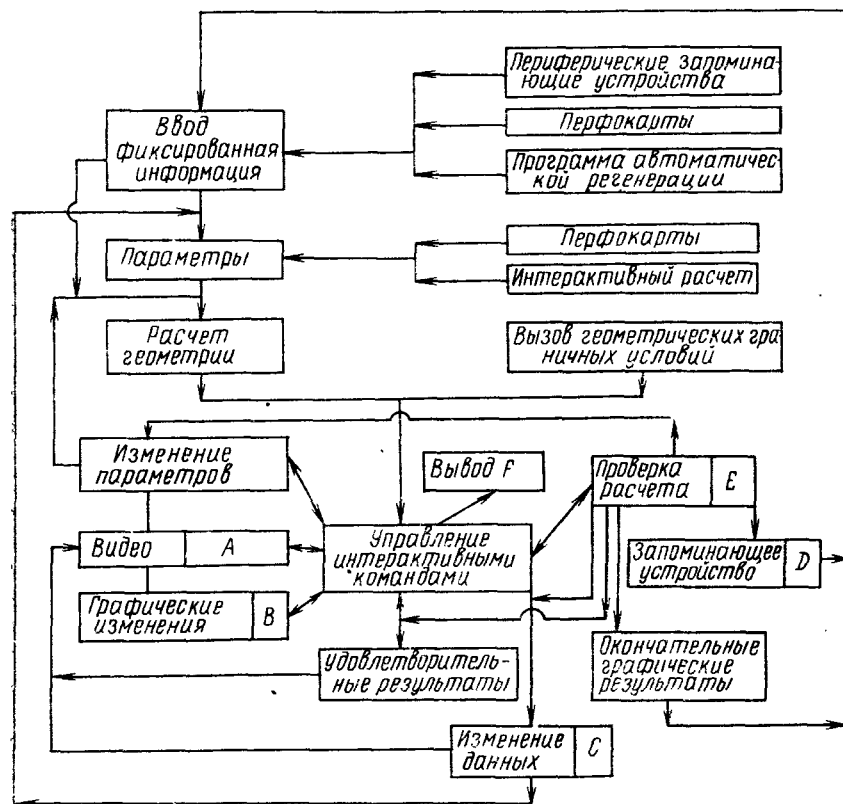


Рис. 11. Блок-схема интерактивной программы PNEUS

Немедленный контроль результата возможен с помощью экрана путем всестороннего визуального изучения данных. Если результат окажется отрицательным, то в этом случае достаточно остановить расчет на первых прогонах программы. С помощью блока В можно изменить ошибочные данные и возобновить расчет.

Если при использовании предварительных данных достигнуто состояние равновесия пневматического сооружения, то оно изучается на экране, где можно рассмотреть его перспективные и аксонометрические проекции. Повороты, переносы и изменения масштаба изображения могут быть осуществлены с помощью блока В, тем самым выполняется начальная оценка проекта с геометрической точки зрения. С помощью блока Е можно также получить на экране сведения о достигнутой точности и об усилиях в мембранной оболочке.

Как только будет закончено изучение первого результата (геометрическая форма — напряженное состояние), становится возможным предпринять следующие шаги:

Рис. 12. Цилиндрическая оболочка с промежуточным точечным закреплением ($Z = \text{const}$); $p = 0,35$ кПа

1 — без внешних нагрузок; 2 — при $p_v = 0,60$ кПа, $p_n = 0$, $E_s = \infty$

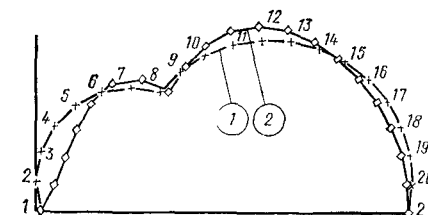


Рис. 13. Цилиндрическая оболочка с промежуточным точечным закреплением ($Z = \text{const}$); $p = 0,35$ кПа

1 — без внешних нагрузок; 2 — при $p_v = 0$, $p_n = -0,15$ кПа от точки 11 до точки 14, $E_s = \infty$

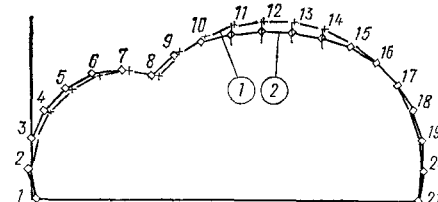


Рис. 14. Цилиндрическая оболочка, закрепленная только по контуру; $p = 0,35$ кПа

1 — без внешних нагрузок; 2 — при $p_n = -0,25$ кПа от точки 2 до точки 20, $E_s = \infty$; 3 — при $p_n = -0,25$ кПа от точки 2 до точки 20, $E_s = 5 \cdot 10^2$ кН/м

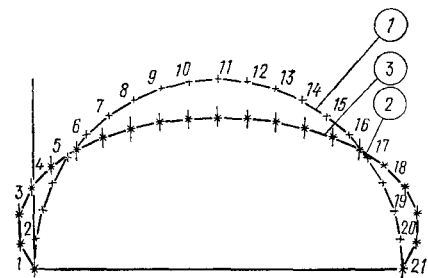


Рис. 15. Цилиндрическая оболочка, закрепленная только по контуру; $p = 0,35$ кПа

1 — без внешних нагрузок; 2 — при $p_v = 0,80$ кПа, $E_s = \infty$; 3 — при $p_v = 0,80$ кПа, $E_s = 5 \cdot 10^2$ кН/м

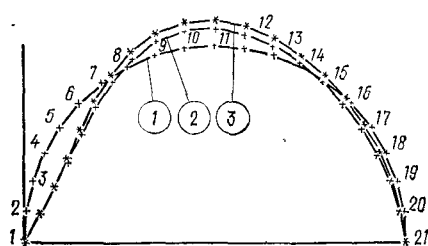
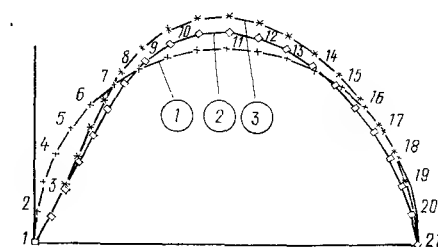


Рис. 16. Цилиндрическая оболочка, закрепленная только по контуру; $p = 0,35$ кПа

1 — без внешних нагрузок; 2 — при $p_v = 0,80$ кПа; $E_s = \infty$; 3 — при $p_v = 0,80$ кПа; $E_s = 3 \cdot 10^2$ кН/м



изменить исходные данные, такие, как внутреннее давление, координаты точек стеснения деформаций, начальные усилия и т. д.; сохранить полученные результаты, передав их в периферическое запоминающее устройство для дальнейшего использования в качестве основы автоматической оптимизации сооружения (блок D);

получить результаты на графопостроителе в виде копий на однократно используемом носителе, а также на печатающем устройстве (блок E).

В случае, если требуется дальнейшая оптимизация, необходимо осуществить изменение параметров, после чего следует команда продолжать расчет.

Как видно из сказанного выше, применение быстродействующих ЭВМ обеспечивает экономную организацию интерактивного процесса проектирования, который расширяет творческие возможности инженера, повышает производительность его труда и улучшает качество проекта. Процессы проектирования и последующей проверки осуществляются здесь значительно быстрее, чем при использовании компьютера в качестве инструмента ввода — вывода данных.

Далее приведены примеры решения некоторых задач.

Плоская задача. На рис. 12 показана геометрия пневматического сооружения после того, как установлены длины стержней аппроксимирующей решетки и граничные условия для точек 1 и 21 и, например, условие для промежуточной точки (допустим, значение Z_8); в этом случае при внутреннем давлении $p=0,35$ кПа напряжение в мембране составляет $S=2,46$ кН/м на участке от точки 1 до точки 8 и $S=3,34$ кН/м на участке от точки 8 до точки 21. На рис. 13 показана деформированная форма, которую принимает сооружение под действием вертикальной снеговой нагрузки ($p_n=0,15$ кПа), приложенной между точками 11 и 14, и которая наложена на первоначальную, но без учета упругости материала. На рисунке видно, что точка 8 перемещается по горизонтали (фактически имитируется скользящий шарнир). Очевидно, это приводит к некоторому снижению напряжения в оболочке при увеличении ее кривизны в незагруженной зоне ($S_{\min(1-8)}=2,32$ кН/м, $S_{\min(8-21)}=3,23$ кН/м).

На рис. 12 показана наложенная на первоначальное очертание форма нерастяжимой оболочки, деформированной под действием ветровой нагрузки ($p_v=0,60$ кПа) с учетом коэффициента $C(\theta)$ (где θ — угол, образованный касательной к оболочке и горизонталью).

Эти величины для наглядности примера выделены из схем, которые не очень строго соответствуют данной ситуации. В рассматриваемом случае $S_{(1-8)}=2,21$ кН/м, $S_{(8-21)}=3,93$ кН/м.

В примерах на рис. 14—16 дается начальная форма пневматического сооружения; на тех же рисунках показана его деформированная форма при разных нагружениях. На рис. 14 показаны деформированные состояния цилиндрической мембраны при внут-

Рис. 17. Зависимость относительных величин максимального перемещения внутри $\delta_{\max}/L$ (где L — пролет сооружения) от внутреннего давления p и скоростного напора p_v

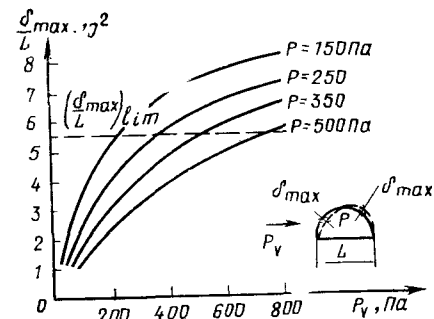
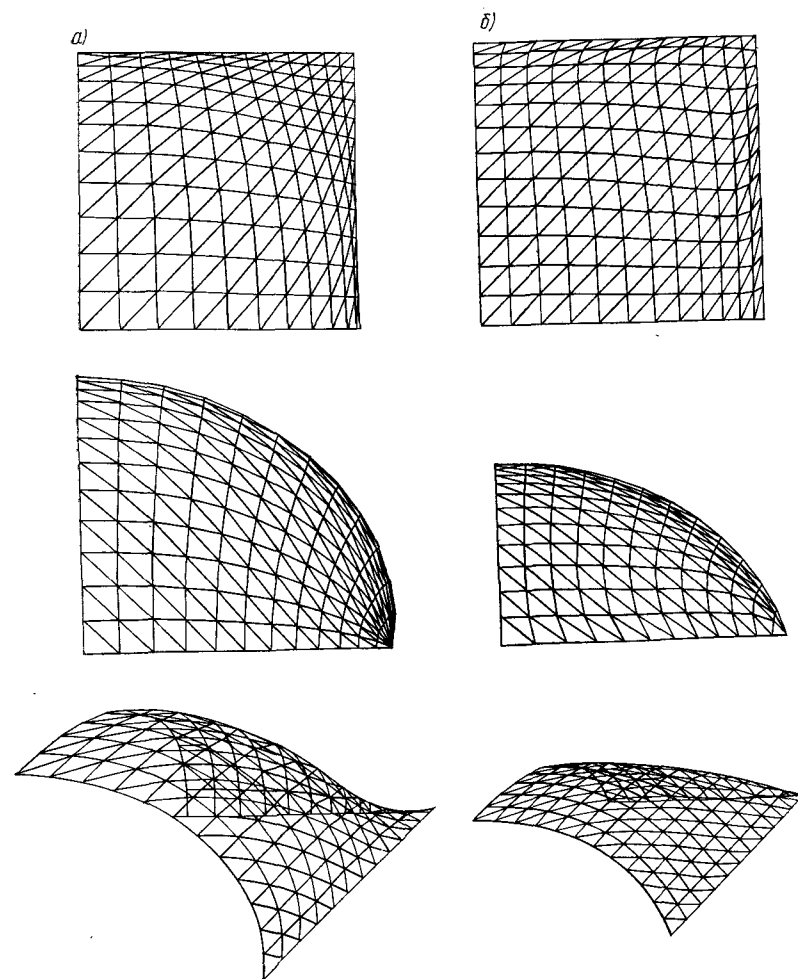


Рис. 18. Решения пневматической оболочки на квадратном плане, полученные в результате интерактивного проектирования

a — пробное решение; б — оптимизированное решение



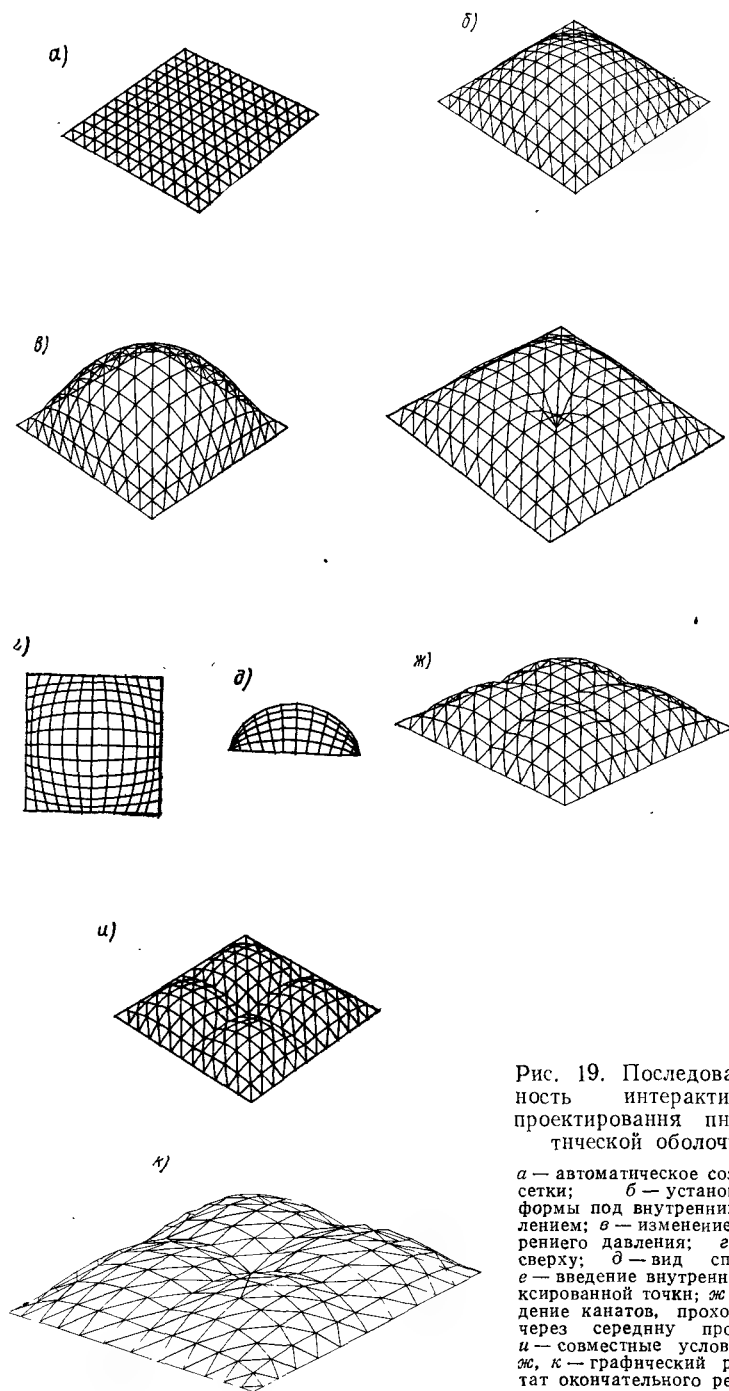


Рис. 19. Последовательность интерактивного проектирования пневматической оболочки

а — автоматическое создание сетки; б — установление формы под внутренним давлением; в — изменение внутреннего давления; г — вид сверху; д — вид спереди; е — введение внутренней фиксированной точки; ж — введение канатов, проходящих через среднюю пролетов; и — совместные условия; е, ж, к — графический результат окончательного решения

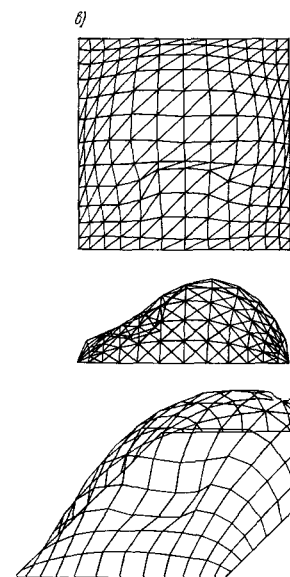
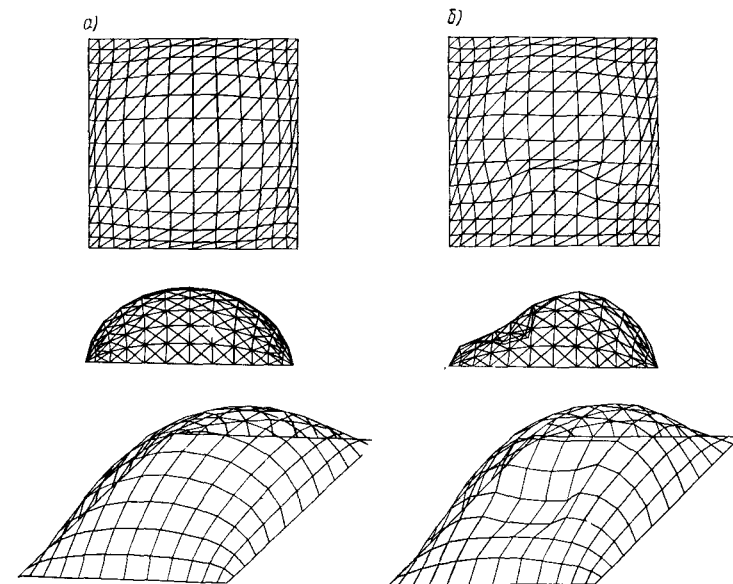


Рис. 20. Пневматическая оболочка, частично нагруженная давлением ветра

а — начальное состояние; б — деформированное состояние нерастяжимой оболочки; в — деформированное состояние упруго растяжимой оболочки

реннем давлении 0,35 кПа под действием снеговой нагрузки интенсивностью $p_n = 0,25$ кПа в секторе между узлами 6 и 16 в случае, если материал нерастяжим, равно как и в том случае, когда произведение $Es = 5 \cdot 10^3$ кН/м.

На рис. 15 и 16 показаны деформированные состояния цилиндрической оболочки под воздействием ветровой нагрузки интенсивностью $p = C(\theta)p_v$, где p_v принято равным 0,80 кПа, а функция $C(\theta)$, в соответствии с данными некоторых авторов [5], получена из опытов на жестких моделях той же формы. При этом материал рассматривается как растяжимый с величинами Es , равными соответственно $5 \cdot 10^2$ и $3 \cdot 10^2$ кН/м.

На основе решений приведенных примеров можно построить диаграммы, которые позволяют, например, определить наибольшее перемещение цилиндрической оболочки внутрь помещений как функцию внутреннего давления p и p_v . На

рис. 17 показаны кривые, позволяющие определить при $p = \text{const}$ максимальные перемещения δ_{max} (внутри), отнесенные к пролету L оболочки, как функции p_v для сооружения, имеющего ту же начальную форму, что и на рис. 14.

Устанавливая максимальную приемлемую величину отношения δ_{max}/L , можно получить зависимость p от p_v (в этом случае почти линейную в диапазоне практических величин p). График такой зависимости полезен для разработки проекта сервомеханизмов системы автоматики эксплуатационного оборудования сооружения. Однако следует отметить, что полученные таким образом предельные перемещения не учитывают специфику турбулентности воздушных потоков, которая также может оказывать воздействие на деформации сооружения.

Примеры пневматических пространственных конструкций. На рис. 18 приведены графические изображения квадратной в плане пневматической оболочки, полученные в результате интерактивного проектирования. На рис. 18, а показаны первые попытки решения, полученные при фиксировании постоянного напряженного состояния оболочки; на рис. 18, б отражены изменения первого пробного решения после оптимизации результатов при условии, что решение предельно близко к поверхности модели, получаемой при пересечении двух круговых цилиндров.

На рис. 19 показаны последовательные результаты интерактивного проектирования, полученные на видеодисплее.

На рис. 20 представлено квадратное в плане пневматическое сооружение, частично загруженное в центральной части. Можно видеть упругие и неупругие компоненты перемещений оболочки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trostel R., Otto F. Zugbeanspruchte Konstruktionen, vol. 1. Ullstein Verlag Frankfurt, 1962.
2. Majowiecki M., Tironi G. Geometrical Configuration of Pneumatic and Tent Structures Obtained with Interactive Computer Aided Design, Iass Worlds Congress on Space Enclosures (W-Cose), Montreal, 1976.
3. Prezieniecki J. S. Theory of Matrix Structural Analysis, McGraw-Hill, 1968.
4. Majowiecki M., Tironi G. Interactive computer aided design in the field of pneumatic structures. International Symposium on Pneumatic Structures, Venice, June 1977.
5. Grillaud G., Gandemer J. Etude de la reponse dynamique d'une structure gonflable: étude en soufflerie, CIB—IASS Symp. Intern. sur les Structures Gonflables, Venezia, giugno 1977.
6. Yermolov V. V. On methods of determining a cylindrical shell's profile deformed by wind action, CIB—IASS Int. Symp. on Air Supported Structures, Venezia, giugno 1977.
7. Haug E., Oelbermann J. Numerical design and analysis of pneumatic structures, CIB—IASS Int. Symp. on Air Supported, Venezia, giugno 1977.
8. Kazuo Ishii. Analytical Shape Determination for Membrane Structures. Iass World Congress on Space Enclosures (W-Cose 76) Montreal, 1976.

9. E. Absi. La théorie des equivalences et son application à l'étude des ouvrages d'art, Annales — I. T. B. T. P., n. 298, 1972.

10. Geiger D., Majowiecki M. Large-span pneumatic structures, reinforced by steel cables, Steel, No. 9, 1977.

11. Chiarugi A., Majowiecki M., Tironi G. On the deformative state of pneumatic structures, I. A. S. S. World Congress, Madrid, 1979.

РАСЧЕТ ВОЗДУХООПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ

Р. Харнах (ФРГ)

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию воздухоопорных оболочек при внутреннем давлении и ветровой нагрузке. После краткого изложения геометрически нелинейной теории мягких оболочек и гибких нитей рассмотрены в общем виде нагрузки, свойства материалов и методы практического расчета воздухоопорных оболочек. Более подробно рассмотрены полуцилиндрические оболочки с торцами на круговом и прямоугольном плане. Приведены некоторые результаты численного расчета усилий и перемещений; обсуждается напряженно-деформированное состояние оболочек и влияние на него различных факторов. Выведены приближенные линейные зависимости для определения основных усилий в форме, часто встречающейся в национальных нормах или инструкциях.

В статье рассматриваются главным образом полуцилиндрические воздухоопорные оболочки при действии ветровых нагрузок. В периоды необычайно сильных штормовых ветров, наблюдавшихся, например, в ФРГ в ноябре 1972 г., были случаи разрушения или повреждения воздухоопорных оболочек. Это показало, что при проектировании и расчете таких оболочек имеется еще ряд нерешенных проблем, а именно:

установление нагрузок (требуемое внутреннее давление, интенсивность и характер распределения ветровой нагрузки);

оценка напряженно-деформированного состояния конструкций (теория расчета, учет деформационных свойств материала, определение усилий и перемещений);

надежность конструкций (прочность и длительные характеристики материала, значения и виды коэффициентов безопасности, причины отказов);

правила эксплуатации (соблюдение безопасных расстояний от оболочки до находящихся под ней предметов, поддержание установленного уровня внутреннего давления).

Несмотря на обилие имеющихся данных испытаний на моделях и численных расчетов оценка напряженно-деформированного со-

стояния воздухопорных оболочек продолжает еще содержать ряд неопределенностей и неточностей. Это становится особенно очевидным из перечисления только наиболее важных факторов, влияющих на надежность результатов расчета. К ним относятся:

геометрия конструкции (форма оболочки, ее габариты, очертание торцов);

характер нагрузок (направление ветра, распределение ветрового давления по поверхности оболочки, внутреннее давление, интенсивность нагрузок);

свойства материала (упругость и вязкость, анизотропия, физическая нелинейность, характеристики при кратковременной и длительной нагрузке, при одноосном и двухосном напряженных состояниях);

вид соединений (влияние усиления оболочки в местах расположения швов);

раскрой оболочек (отклонения от проектной формы).

Может оказаться существенным влияние и ряда других факторов. Определенные трудности вызываются еще и тем, что при численном расчете могут быть получены некоторые не вполне надежные данные, обусловленные как принятыми теоретическими предположениями, так и самой процедурой расчета; эти данные нуждаются в надлежащей интерпретации, а в отдельных случаях могут привести к ошибкам в окончательных результатах.

Чтобы получить достаточно достоверные расчетные зависимости, мы ограничимся рассмотрением оболочек простейшего геометрического очертания — цилиндрических с закругленными торцами или на прямоугольном плане (см. далее рис. 1, а и б), без учета подкреплений тросами или усиления в местах расположения швов. При этом предполагается, что оболочки имеют идеальную геометрическую форму.

2. ТЕОРИЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕК

2.1. Предварительные замечания. Воздухопорные конструкции относятся к мягким большепролетным оболочкам. [3, 22]. Они выполняются из тканей с покрытиями и в ряде случаев подкрепляются тросами. Размер поперечного сечения оболочки (ее толщина) настолько мал по сравнению с пролетом, что изгибной жесткостью оболочки можно пренебречь. Таким образом, воздухопорные оболочки принадлежат к классу мягких оболочек (мембран), в которых внешние нагрузки уравниваются только нормальными усилиями, а изгибающие моменты пренебрежимо малы. Поскольку при этом перемещения оболочек велики по сравнению с их общими размерами, для их расчета необходимо использовать геометрически нелинейную теорию. Относительные деформации¹ оболочек, наоборот, в общем невелики, так что расчет можно производить в рамках физически линейной теории, тем более что количественное

¹ Т. е. удлинения (Прим. ред.).

описание нелинейного поведения материала связано с большими трудностями. Поэтому в дальнейшем приводятся основные зависимости геометрически нелинейной и физически линейной теории мягких оболочек и гибких нитей (тросов), причем более детально рассмотрены возможные упрощения соотношений между относительными деформациями и перемещениями, а также особые случаи геометрии конструкций. Нелинейные теории оболочек разработаны в трудах многих авторов; теория мягких оболочек подробно изложена и рассмотрена на примерах в работе [22]. Ниже используется тензорная форма записи, принятая в общей теории оболочек [7].

2.2. Общая геометрическая нелинейная теория мягких оболочек. Полная система уравнений геометрически нелинейной теории однородных гиперупругих мягких оболочек построена в работе [7]. Будем полагать все величины отнесенными к начальному (ненапряженному и недеформированному) состоянию оболочки. Тогда значения трех усилий ($n^{\alpha\beta} = n^{\beta\alpha}$), трех относительных деформаций ($\alpha_{\alpha\beta} = \alpha_{\beta\alpha}$) и трех перемещений (u_α , u_3) определяются из следующих уравнений:

трех соотношений между относительными деформациями и перемещениями

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (\varphi_{\alpha\beta} + \varphi_{\beta\alpha} + \varphi_{\lambda\alpha} \varphi_{\lambda\beta}^{\lambda} + \varphi_{\lambda\beta}^3 \varphi_{\lambda\alpha}^3); \quad (2.1)$$

трех условий равновесия

$$(n^{\alpha\beta} + \varphi_{\lambda}^{\beta} n^{\alpha\lambda}) |_{\alpha} - \varphi_{\lambda}^3 b_{\beta}^{\alpha} n^{\alpha\lambda} + p^{\beta} = 0; \quad (2.2)$$

$$(\varphi_{\lambda}^3 n^{\alpha\lambda}) |_{\alpha} + (\delta_{\lambda}^{\beta} + \varphi_{\lambda}^{\beta}) b_{\alpha\beta} n^{\alpha\lambda} + p^3 = 0; \quad (2.3)$$

и трех уравнений состояния

$$n^{\alpha\beta} = \partial U / \partial \alpha_{\alpha\beta}, \quad (2.4)$$

где

$$\varphi_{\alpha\beta} = u_{\alpha} |_{\beta} - b_{\alpha\beta} u_3; \quad (2.5) \quad \varphi_{\beta}^{\alpha} = u^{\alpha} |_{\beta} - b_{\beta}^{\alpha} u_3; \quad (2.6)$$

$$\varphi_{\alpha}^3 = u_{3,\alpha} + b_{\alpha}^{\beta} u_{\beta}. \quad (2.7)$$

Здесь $b_{\alpha\beta} = b_{\beta\alpha}$ — (симметричный) тензор кривизны; u_{α} и u_3 — тангенциальные и нормальное перемещения; p^{α} и p^3 — тангенциальные и нормальная составляющие нагрузки; δ_{β}^{α} — символ Кронеккера; $(...)|$ — обозначения ковариантных производных.

Индексы, обозначенные греческими буквами, принимают значения 1 и 2, причем суммирование по одинаковым верхним и нижним индексам производится в соответствии с соглашением Эйнштейна.

Приведенная выше система уравнений является «полной» в смысле оптимальной теории оболочек. Тензор относительных деформаций $\alpha_{\alpha\beta}$ образуется как разность метрических тензоров деформированной и недеформированной поверхностей оболочки $\tilde{a}_{\alpha\beta}$ и $a_{\alpha\beta}$

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (\tilde{a}_{\alpha\beta} - a_{\alpha\beta}) \quad (2.8)$$

и не содержит никаких упрощений. Уравнения равновесия (2.2) и (2.3), выведенные на основе вариационного принципа, являются, таким образом, также «полными» и не содержат каких-либо упрощений [7].

Удельная энергия формоизменения U является функцией $\alpha_{\alpha\beta}$ и зависит от свойств материала. Например, для линейно-упругого материала

$$U = \frac{1}{2} E^{\alpha\beta\rho\lambda} \alpha_{\alpha\beta} \alpha_{\rho\lambda}, \quad (2.9)$$

откуда согласно (2.4)

$$n^{\alpha\beta} = E^{\alpha\beta\rho\lambda} \alpha_{\rho\lambda}. \quad (2.10)$$

В данном случае тензор упругих характеристик $E^{\alpha\beta\rho\lambda}$ содержит, в силу свойств симметрии $n^{\alpha\beta}$ и $\alpha_{\alpha\beta}$, только шесть констант материала. Для изотропного материала

$$E^{\alpha\beta\rho\lambda} = \frac{Et}{1-\nu^2} \frac{1}{2} (1-\nu) \left(\alpha^{\alpha\lambda} \alpha^{\beta\rho} + \alpha^{\alpha\rho} \alpha^{\beta\lambda} + \frac{2\nu}{1-\nu} \alpha^{\alpha\beta} \alpha^{\rho\lambda} \right), \quad (2.11)$$

причем свойства материала описываются всего двумя константами — модулем упругости E и коэффициентом поперечной деформации ν .

Принятая здесь тензорная форма записи применима для оболочек любой формы. Переход к конкретной форме оболочки (сфера, цилиндр) осуществляется просто, если ввести соответствующие криволинейные координаты θ^α и описать геометрию оболочки единичным вектором $\underline{r} = \underline{r}(\theta^\alpha)$. При этом известным образом определяются все необходимые геометрические параметры: базисные векторы $\underline{a}_\alpha = \underline{r}_{,\alpha}$; метрические тензоры — ковариантный $a_{\alpha\beta} = \underline{a}_\alpha \underline{a}_\beta$ и контравариантный $a^{\alpha\beta} a_{\beta\lambda} = \delta^\alpha_\lambda$; единичный вектор нормали $\underline{a}_3 = \underline{a}_1 \times \underline{a}_2 / |\underline{a}_1 \times \underline{a}_2|$ и т. д.

Для оболочки в форме кругового цилиндра таким образом может быть получена следующая система уравнений (в «физических» величинах):

$$\alpha_x = u_{x,x} + \frac{1}{2} (u_{x,x})^2 + \frac{1}{2} (u_{\varphi,x})^2 + \frac{1}{2} (u_{,x})^2; \quad (2.12)$$

$$\alpha_\varphi = \frac{1}{R} (u_{\varphi,\varphi} - u) + \frac{1}{2R^2} (u_{x,\varphi})^2 + \frac{1}{2R^2} (u_{\varphi,\varphi} - u)^2 + \frac{1}{2R^2} (u_{,\varphi} + u_\varphi)^2; \quad (2.13)$$

$$\alpha_{x\varphi} = \frac{1}{2R} u_{x,\varphi} + \frac{1}{2} u_{\varphi,x} + \frac{1}{2R} (u_{x,x} u_{x,\varphi} + u_{\varphi,x} u_{\varphi,\varphi} - u_{\varphi,x} u + u_{,x} u_{,\varphi} + u_{,x} u_\varphi); \quad (2.14)$$

$$\left(n_x + u_{x,x} n_x + \frac{1}{R} u_{x,\varphi} n_{x\varphi} \right)_{,x} + \frac{1}{R} \left(n_{x\varphi} + u_{x,x} n_{x\varphi} + \frac{1}{R} u_{x,\varphi} n_{\varphi\varphi} \right)_{,\varphi} + p_x = 0; \quad (2.15)$$

$$\left(u_{,x} n_x + \frac{1}{R} u_{,\varphi} n_{x\varphi} + \frac{1}{R} u_\varphi n_{x\varphi} \right)_{,x} + \frac{1}{R} \left(u_{,x} n_{x\varphi} + \frac{1}{R} u_{,\varphi} n_{\varphi\varphi} + \frac{1}{R} u_\varphi n_{\varphi\varphi} \right)_{,\varphi} + \frac{1}{R} \left(n_\varphi + \frac{1}{R} u_{\varphi,\varphi} n_\varphi - \frac{1}{R} u n_\varphi \right) + \frac{1}{R} u_{\varphi,x} n_{x\varphi} + p = 0; \quad (2.16)$$

$$\left(n_{x\varphi} + \frac{1}{R} u_{\varphi,\varphi} n_{x\varphi} - \frac{1}{R} u n_{x\varphi} + u_{\varphi,x} n_x \right)_{,x} + \frac{1}{R} \left(n_x + u_{\varphi,x} n_{x\varphi} + \frac{1}{R} u_{\varphi,\varphi} n_\varphi - \frac{1}{R} u n_\varphi \right)_{,\varphi} - \frac{1}{R} u_x n_{x\varphi} - \frac{1}{R^2} u_{,\varphi} n_\varphi - \frac{1}{R^2} u_\varphi n_\varphi + p_\varphi = 0; \quad (2.17)$$

$$n_x = E_{xxxx} \alpha_x + 2RE_{xx\varphi\varphi} \alpha_{x\varphi} + R^2 E_{xx\varphi\varphi} \alpha_\varphi; \quad (2.18)$$

$$n_{x\varphi} = RE_{xxx\varphi} \alpha_x + 2R^2 E_{x\varphi\varphi\varphi} \alpha_{x\varphi} + R^3 E_{x\varphi\varphi\varphi} \alpha_\varphi; \quad (2.19)$$

$$n_\varphi = R^2 E_{xx\varphi\varphi} \alpha_x + 2R^3 E_{x\varphi\varphi\varphi} \alpha_{x\varphi} + R^4 E_{\varphi\varphi\varphi\varphi} \alpha_\varphi. \quad (2.20)$$

Здесь R — радиус цилиндра; x — координата в направлении длины цилиндра; φ — центральный угол в кольцевом направлении.

Для решения приведенных выше систем уравнений необходимо еще ввести граничные условия, которые целесообразно строить на основе вариационных принципов [7]. Ввиду высокой степени геометрической нелинейности уравнений (2.1) — (2.7) или (2.12) — (2.20) найти их решения (в аналитической или численной форме) чрезвычайно трудно или вообще возможно лишь для простейших случаев; поэтому представляется целесообразным их упрощение.

2.3. Упрощенные теории мягких оболочек. Если в уравнениях (2.1) — (2.3) последовательно опустить все величины, характеризующие геометрическую нелинейность, получим известную систему уравнений геометрически линейной теории мягких оболочек:

$$n^{\alpha\beta} |_\alpha + p^\beta = 0; \quad (2.21) \quad b_{\alpha\beta} n^{\alpha\beta} + p^3 = 0; \quad (2.22)$$

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (u_\alpha |_\beta + u_\beta |_\alpha - 2b_{\alpha\beta} u_3); \quad (2.23) \quad n^{\alpha\beta} = \partial U / \partial \alpha_{\alpha\beta}. \quad (2.24)$$

Дополняя тензор относительных деформаций (2.22) простейшим нелинейным слагаемым $u_{3,\alpha} u_{3,\beta} / 2$, получим систему уравнений упрощенной геометрически нелинейной теории мягких оболочек 1-го порядка (типа Доннелла — Маргерра):

$$n^{\alpha\beta} |_\alpha + p^\beta = 0; \quad (2.25)$$

$$b_{\alpha\beta} n^{\alpha\beta} + (n^{\alpha\beta} u_{3,\beta}) |_\alpha + p^3 = 0; \quad (2.26)$$

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (u_\alpha |_\beta + u_\beta |_\alpha - 2b_{\alpha\beta} u_3 + u_{3,\alpha} u_{3,\beta}); \quad (2.27)$$

$$n^{\alpha\beta} = \partial U / \partial \alpha_{\alpha\beta}. \quad (2.28)$$

Естественно, что упрощенное представление относительных деформаций (2.27) последовательно приводит также к упрощению условий равновесия и, равным образом, граничных условий. В работе [7] вывод упрощенной (но совместной) системы уравнений (2.25) — (2.28) осуществлен на основе вариационного принципа. Путем дополнения (2.27) или упрощения (2.1) можно, конечно, построить и другие системы уравнений; при этом неизбежно придется изменить формулировку условий равновесия, но таким образом, чтобы они не противоречили основным принципам механики.

Для оболочек в форме кругового цилиндра в соответствии с нелинейной теорией 1-го порядка имеем:

$$n_{x,x} + \frac{1}{R} n_{x\varphi,\varphi} + p_x = 0; \quad (2.29) \quad n_{x\varphi,x} + \frac{1}{R} n_{\varphi,\varphi} + p_\varphi = 0; \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{R} n_\varphi + \left(u_{,x} n_x + \frac{1}{R} u_{,\varphi} n_{x\varphi} \right)_{,x} + \left(\frac{1}{R} u_{,x} n_{x\varphi} + \frac{1}{R^2} u_{,\varphi} n_\varphi \right)_{,\varphi} + p = 0; \quad (2.31)$$

$$\alpha_x = u_{x,x} + \frac{1}{2} (u_{,x})^2; \quad (2.32)$$

$$\alpha_{x\varphi} = \frac{1}{2R} u_{x,\varphi} + \frac{1}{2} u_{\varphi,x} + \frac{1}{2R} u_{,x} u_{,\varphi}; \quad (2.33)$$

$$\alpha_\varphi = \frac{1}{R} u_{\varphi,\varphi} - \frac{1}{R} u + \frac{1}{2R^2} (u_{,\varphi})^2. \quad (2.34)$$

Уравнения состояния сохраняются в прежнем виде.

2.4. Общая геометрически нелинейная теория гибких нитей (тросов). На основе полной системы уравнений общей геометрически нелинейной теории мягких оболочек (2.1) — (2.7) могут быть записаны эквивалентные уравнения теории гибких нитей. Если, например, геометрия нити описывается одной координатой θ^2 , то опуская все величины, зависящие от координаты θ^1 , получим систему уравнений геометрически нелинейной теории однородных гиперупругих нитей, в которой все величины, как и выше, отнесены к начальному (ненапряженному и недеформированному) состоянию. При этом значения усилий n^{22} , относительных удлинений α_{22} и перемещений u_2, u_3 определяются из следующих четырех уравнений:

соотношения между удлинениями и перемещениями

$$\alpha_{22} = u_2|_2 - b_{22} u_3 + \frac{1}{2} (u_{3,2} u_{3,2} + b_{22} b_{22}^2 u_3 u_3 + u^2|_2 u_2|_2 + b_{22} b_{22} u^2 u^2 - [b_{22}^2 u_2|_2 + b_{22} u^2|_2] u_3 + 2b_{22} u^2 u_3|_2); \quad (2.35)$$

двух условий равновесия

$$(n^{22} - b_{22}^2 u_3 n^{22} + u^2|_2 n^{22})|_2 - b_{22}^2 (u_{3,2} + b_{22} u^2) n^{22} + p^2 = 0; \quad (2.36)$$

$$(u_{3,2} n^{22} + b_{22} u^2 n^{22})|_2 + (1 - b_{22}^2 u_3 + u^2|_2) b_{22} n^{22} + p^3 = 0 \quad (2.37)$$

и уравнения состояния

$$n^{22} = \partial U / \partial \alpha_{22}. \quad (2.38)$$

Необходимо иметь в виду, что здесь ковариантная производная образуется в том же смысле, что и в теории мягких оболочек, дифференцированием по одной координате θ^2 .

Как и в теории мягких оболочек, приведенная система уравнений является «полной» в смысле оптимальной теории линейных (двухмерных) систем. Она должна быть еще дополнена граничными условиями, которые могут быть выведены на основе вариационного принципа.

Ниже рассмотрим подробнее гибкие нити кругового очертания в связи с их особым значением для расчета цилиндрических воздухопородных оболочек и простотой их геометрического описания.

2.5. Геометрически нелинейная теория круговой гибкой нити. Обозначив через R радиус окружности нити и через θ^2 текущее значение центрального угла, а также учитывая, что в данном случае $a_{22} = R^2$; $a^{22} = 1/R$; $b_{22} = R$; $b_2^2 = 1/R$; $b^{22} = 1/R^3$, получаем полную систему уравнений геометрически нелинейной теории круговой гибкой нити:

$$\alpha_{22} = u_{2,2} - R u_3 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R^2} u_{2,2} u_{2,2} + \frac{1}{R^2} u_2 u_2 - \frac{2}{R} u_{2,2} u_3 + \frac{2}{R} u_2 u_{3,2} + u_{3,2} u_{3,2} + u_3 u_3 \right); \quad (2.39)$$

$$n_{,2}^2 \left(1 + \frac{1}{R^2} u_{2,2} - \frac{1}{R} u_3 \right) + n^{22} \left(\frac{1}{R^2} u_{2,22} - \frac{1}{R^2} u_2 - \frac{2}{R} u_{3,2} \right) + p^2 = 0; \quad (2.40)$$

$$n_{,2}^2 \left(u_{3,2} + \frac{1}{R} u_2 \right) + n^{22} \left(R + \frac{2}{R} u_{2,2} + u_{3,22} - u_3 \right) + p^3 = 0; \quad (2.41)$$

$$n^{22} = \partial U / \partial \alpha_{22}. \quad (2.42)$$

Отметим, что здесь ковариантная производная превращается в частную производную. Если заменить в уравнениях (2.39) — (2.42) тензорные величины обычными «физическими» величинами, получим окончательно систему уравнений в виде:

$$\alpha_\varphi = \frac{1}{R} (u_{\varphi,\varphi} - u) + \frac{1}{2R^2} (u_{\varphi,\varphi} u_{\varphi,\varphi} + u_{\varphi} u_\varphi - 2u_{\varphi,\varphi} u + 2u_\varphi u_{,\varphi} + u_{,\varphi} u_{,\varphi} + uu); \quad (2.43)$$

$$n_{\varphi,\varphi} (R + u_{\varphi,\varphi} - u) + n_\varphi (u_{\varphi,\varphi\varphi} - u_\varphi - 2u_{,\varphi}) + R^2 p_\varphi = 0; \quad (2.44)$$

$$n_{\varphi,\varphi} (u_{,\varphi} + u_\varphi) + n_\varphi (R + u_{\varphi,\varphi} - u) + R^2 p = 0; \quad (2.45)$$

$$n_\varphi = D \alpha_\varphi, \quad (2.46)$$

где $D = EA$ — жесткость нити при растяжении; α_φ — относительное удлинение нити; n_φ — усилие в нити; u_φ и u — тангенциальное и нормальное перемещения нити; p_φ и p — тангенциальная и нормальная составляющие нагрузки.

Для простоты материал нити в уравнении (2.46) принят линейно-упругим.

На основе уравнений (2.43) — (2.46) может быть построен ряд упрощенных теорий. Для начала, опуская последовательно все ве-

личины, характеризующие геометрическую нелинейность, получим систему уравнений:

$$\alpha_{\varphi} = \frac{1}{R} (u_{\varphi, \varphi} - u); \quad (2.47) \quad n_{\varphi, \varphi} + R p_{\varphi} = 0; \quad (2.48)$$

$$n_{\varphi} + R p = 0; \quad (2.49) \quad n_{\varphi} = D \alpha_{\varphi}. \quad (2.50)$$

Из уравнений равновесия непосредственно следует:

$$n_{\varphi} = -R p \text{ и } p_{, \varphi} = -p_{\varphi}, \quad (2.51)$$

что не имеет смысла, поскольку нагрузка должна иметь ограниченную величину. Таким образом, «геометрически линейная» теория гибкой нити не имеет практического значения; приведенные уравнения соответствуют лишь особому случаю нерастяжимой нити, нагруженной равномерным внутренним давлением $p = -p_i = \text{const}$. В этом случае, когда $D \rightarrow \infty$, уравнение (2.50) теряет смысл, и остается одно уравнение (2.49), приводящее к известному выражению

$$n_{\varphi} = R p_i. \quad (2.52)$$

Дополняя линейную меру удлинения (2.47) нелинейным слагаемым $\frac{1}{2R^2} u_{, \varphi} u_{, \varphi}$, получаем систему уравнений упрощенной нелинейной теории круговой нити 1-го порядка:

$$\alpha_{\varphi} = \frac{1}{R} \left(u_{\varphi, \varphi} - u + \frac{1}{2R} u_{, \varphi} u_{, \varphi} \right); \quad (2.53) \quad n_{\varphi, \varphi} + R p_{\varphi} = 0; \quad (2.54)$$

$$R n_{\varphi} + (n_{\varphi} u_{, \varphi})_{, \varphi} + R^2 p = 0; \quad (2.55) \quad n_{\varphi} = D \alpha_{\varphi}. \quad (2.56)$$

Если же учесть в уравнении (2.53) еще одно нелинейное слагаемое $\frac{1}{2R^2} u u$, то получим систему уравнений упрощенной геометрической нелинейной теории круговой нити 2-го порядка:

$$\alpha_{\varphi} = \frac{1}{R} \left(u_{\varphi, \varphi} - u + \frac{1}{2R} u_{, \varphi} u_{, \varphi} + \frac{1}{2R} u u \right); \quad (2.57)$$

$$n_{\varphi, \varphi} + R p_{\varphi} = 0; \quad (2.58)$$

$$R n_{\varphi} + (n_{\varphi} u_{, \varphi})_{, \varphi} - n_{\varphi} u + R^2 p = 0, \quad (2.59) \quad n_{\varphi} = D \alpha_{\varphi}. \quad (2.60)$$

Из этих двух простых примеров уже видно, что на основе общей системы уравнений (2.43) — (2.46) может быть, вообще говоря, построено множество упрощенных теорий. Однако при этом следует всегда иметь в виду, что соотношения между удлинениями и перемещениями и условия равновесия не должны противоречить друг другу и что надлежащим образом должны быть заданы также граничные условия. Такого рода теории, чтобы обеспечить их «совместность», целесообразно строить на основе вариационных принципов. Следует также особо проверять (как это было показано выше), удовлетворяет ли формально построенная теория основным принципам механики.

2.6. Дополнения. Воздухоопорные оболочки имеют еще некоторые особенности, на которых мы коротко остановимся. Вследствие

своей весьма малой изгибной жесткости оболочка не может воспринимать сжимающих усилий. Поэтому уровень предварительного напряжения оболочки внутренним давлением должен быть достаточно высоким, чтобы создаваемые им растягивающие усилия не «погашались» полностью внешними нагрузками (например, от снега), за исключением, может быть, отдельных небольших участков оболочки. Появление в оболочке «сжимающих напряжений» приводит, в частности, к образованию складок.

Жесткость при растяжении D материала оболочек в большинстве случаев настолько велика, что его относительные удлинения пренебрежимо малы. В связи с этим может оказаться целесообразным использование в расчетах приближенных решений теории чистого изгибания оболочек [6], в которой относительные деформации принимаются тождественно равными нулю. При этом уравнения состояния отпадают. Условием возможности применения данной теории является физическая осуществимость соответствующего деформированного состояния оболочки. В рассматриваемом случае общая система уравнений (2.1) — (2.4) упрощается и принимает вид:

$$0 = \varphi_{\alpha\beta} + \varphi_{\beta\alpha} + \varphi_{\lambda\alpha} \varphi_{\lambda\beta}^{\lambda} + \varphi_{\alpha}^3 \varphi_{\beta}^3; \quad (2.61)$$

$$(n^{\alpha\beta} + \varphi_{\lambda}^{\beta} n^{\alpha\lambda})|_{\alpha} - \varphi_{\lambda}^3 b_{\alpha}^{\beta} n^{\alpha\lambda} + p^{\beta} = 0; \quad (2.62)$$

$$(\varphi_{\lambda}^3 n^{\alpha\lambda})|_{\alpha} + (\delta_{\lambda}^{\beta} + \varphi_{\lambda}^{\beta}) b_{\alpha\beta} n^{\alpha\lambda} + p^3 = 0; \quad (2.63)$$

где обозначения даны в уравнениях (2.5) — (2.7). Из этих уравнений (всего шести) определяются значения $n^{\alpha\beta} = n^{\beta\alpha}$, u_{α} и u .

Если решение системы (2.61) — (2.63) при заданных граничных условиях существует, то оно соответствует чистому изгибанию оболочки без растяжения. Более подробно этот вопрос изложен в работе [6]. Методику расчета легко объяснить на примере круговой нити при внутреннем давлении и ветровой нагрузке. В случае использования теории 1-го порядка из уравнений (2.53) — (2.56) получаем:

$$0 = u_{\varphi, \varphi} - u + \frac{1}{2R} u_{, \varphi} u_{, \varphi}; \quad (2.64) \quad n_{\varphi, \varphi} = 0; \quad (2.65)$$

$$R n_{\varphi} + (u_{, \varphi} n_{\varphi})_{, \varphi} + R^2 p = 0, \quad (2.66)$$

где p — суммарная нагрузка от ветра (w) и внутреннего давления (p_i); $p_{\varphi} = 0$.

Из уравнения (2.65) получаем:

$$n_{\varphi} = C_1; \quad (2.67)$$

из уравнения (2.66) следует

$$u = -\frac{R^2}{C_1} \iint p d\varphi d\varphi - R \frac{\varphi^2}{2} + \frac{C_2}{C_1} \varphi + C_3; \quad (2.68)$$

из уравнения (2.64) имеем

$$u_{\varphi} = \int u d\varphi - \frac{1}{2R} \int u_{, \varphi} u_{, \varphi} d\varphi + C_1. \quad (2.69)$$

При заданной нагрузке p можно вычислить указанные интегралы; тогда усилие n_ϕ и перемещения u_ϕ и u определяются непосредственно в зависимости от постоянных интегрирования $C_1, \dots, C_4$, которые находят из четырех граничных условий для u_ϕ и u . Следует отметить, что постоянные интегрирования могут быть найдены лишь при определенной форме задания граничных условий; в рассматриваемом случае это легко сделать, если концы нити неподвижно закреплены. Не вдаваясь в подробности, заметим, что, например, для упрощенной теории цилиндрической мембраны 1-го порядка в форме (2.29) — (2.34) решение не существует, если мембрана неподвижно закреплена по четырем сторонам.

3. НАГРУЗКИ

3.1. Предварительные замечания. Применительно к воздухоопорным оболочкам не представляется возможным исследовать отдельно только ветровую нагрузку, поскольку одновременно с ней на оболочку действуют еще по крайней мере собственный вес и внутреннее давление, далее эти три вида нагрузок будут рассмотрены более подробно. Собственный вес оболочки в общем не играет существенной роли. Внутреннее давление можно надлежащим образом регулировать, устанавливая его в соответствии с условиями эксплуатации сооружения. Что касается ветровой нагрузки, то для ее назначения пока еще нет достаточно обоснованных данных. Ветровая нагрузка зависит от многих параметров, в том числе и от принятой величины внутреннего давления.

Кроме упомянутых выше нагрузок, на воздухоопорные оболочки могут действовать еще снеговая нагрузка и особые нагрузки (например, нагрузки от оборудования); однако в настоящей статье они не рассматриваются.

Ввиду многообразия возможных геометрических форм воздухоопорных оболочек мы ограничимся в дальнейшем рассмотрением типичных форм оболочек, показанных на рис. 1.

3.2. Собственный вес. Собственный вес оболочки g существенным образом определяется ее материалом. Для обычно применяемых в настоящее время пролетов оболочек и типов тканей собственный вес редко превышает 10 Н/м^2 , что, как правило, пренебрежимо мало по сравнению с внутренним давлением и ветровой нагрузкой. Исключения возможны лишь при использовании весьма тяжелых тканей (в оболочках очень больших пролетов) либо при устройстве дополнительной теплоизоляции оболочек с целью экономии энергии [2]. В некоторых случаях необходимо учитывать также постоянные нагрузки от веса элементов оборудования, осветительных приборов и т. п. Прежде указывалось также на возможность повышения собственного веса оболочек вследствие намокания ткани; однако теперь, в связи с применением эффективных водоотталкивающих покрытий, этот вопрос потерял свое значение.

3.3. Внутреннее давление. Внутреннее избыточное давление воздуха p_i в сооружении создается обычно с помощью вентиляторов

(воздуходувок). Внутреннее давление не является строго неизменным в течение времени, поскольку постоянно происходит утечка воздуха из оболочки через разного рода неплотности, которую необходимо компенсировать. Поэтому следует различать номинальное и эксплуатационное внутреннее давление. Под номинальным понимают внутреннее давление, принимаемое в расчетах оболочек и регламентируемое соответствующими национальными нормами. Эксплуатационное (фактическое) давление воздуха, устанавливаемое в зависимости от изменения условий эксплуатации сооружения, может в большей или меньшей степени отличаться от номинального. В особенности это относится к системам с автоматическим регулированием давления в зависимости от скорости ветра.

Внутреннее избыточное давление воздуха создает предварительное напряжение оболочки и тем самым обеспечивает несущую способность воздухоопорного сооружения в целом. Оно имеет решающее значение для стабильности формы и надежности сооружения, а также в значительной степени определяет напряженно-деформированное состояние оболочки. Внутреннее давление должно быть по меньшей мере достаточным для придания оболочке требуемой формы с учетом собственного веса. Необходимо, далее, чтобы при любых возможных нагрузках во всей оболочке действовали только растягивающие усилия, за исключением отдельных небольших участков — например, в местах анкеровки или в переходных областях между зонами различной кривизны. Значительное складкообразование и, тем более, «флаттер» (полоскание) оболочки должны быть, безусловно, исключены по соображениям надежности. При слишком малом внутреннем давлении возможны чрезмерно большие перемещения оболочки, которые могут привести к уменьшению полезного объема сооружения, а в отдельных случаях — к соприкосновению оболочки с находящимися под ней предметами и к разрушению материала оболочки. С другой стороны, слишком высокое внутреннее давление также невыгодно, поскольку это вызывает повышенный расход энергии и перенапряжение несущих элементов конструкции (оболочки и анкерных устройств).

Таким образом, для правильного выбора внутреннего давления следует руководствоваться требованиями как надежности, так и экономичности сооружения. Критерии для установления минимального и максимального внутреннего давления, а также рекомендации по назначению этой величины в обычных условиях эксплуатации приведены, в частности, в работе [9]. В работе [20] на основании результатов испытаний моделей рекомендуется принимать следующие отношения внутреннего давления к скоростному напору ветра (p/q):

для полуцилиндрических оболочек (при $h=r$) — 0,62;
для пологих цилиндрических оболочек (при $h < r$) — 0,50;
для полусферических оболочек — 0,74.

При этих отношениях оболочка деформируется лишь в области положительного ветрового давления (напора). Аналогичные значения приведены в работах [5, 16, 27].

Следует вкратце отметить еще одну особенность. При ветровой нагрузке происходит деформация оболочки, вызывающая уменьшение объема сооружения. При этом, если температура и масса воздуха в объеме сооружения остаются неизменными, происходит повышение внутреннего давления, так как произведение объема на давление является константой. Влияние этого фактора, однако, невелико, поскольку максимальный скоростной напор ветра достигается лишь при коротких порывах (пульсациях). В работе [23] для трех исследованных случаев обнаружено повышение внутреннего давления от 2,3 до 6 %, причем большее из этих значений соответствует пологой цилиндрической оболочке (относительно наиболее деформативной) с радиусом 18 м. Столь незначительным повышением внутреннего давления можно пренебречь в запас надежности.

3.4. Ветровая нагрузка. Ветровая нагрузка w , неравномерно распределенная по поверхности воздухоопорной оболочки, обычно представляется в форме $w = cq$, где c — аэродинамический коэффициент (положительный при напоре и отрицательный при отсосе), q — скоростной напор ветра.

Скоростной напор q определяется скоростью ветра, обтекающего сооружение. Описание реального поля ветра, характеризующегося наличием турбулентных вихрей (порывов), будет, по-видимому, даже в обозримом будущем связано с введением ряда гипотез и упрощений. Поэтому в конкретных случаях при назначении расчетного скоростного напора ветра руководствуются соответствующими нормами и инструкциями. Для практических расчетов в общем достаточно учитывать лишь статическую составляющую скоростного напора, хотя, вообще говоря, он содержит также квазистатическую и динамическую составляющие.

Значения аэродинамического коэффициента c , характеризующего местное распределение ветровой нагрузки по поверхности сооружения, определяются для воздухоопорных оболочек пока только путем испытания моделей в аэродинамических трубах. Использование этих значений для описания реального нагружения натуральных сооружений возможно лишь с учетом определенных факторов, подробно рассмотренных в соответствующей литературе [4, 5, 16, 20, 26]. Из них следует упомянуть влияние числа Рейнольдса; соблюдение закона подобия модели по материалу; тип модели (жесткая или гибкая); характер потока (ламинарный или турбулентный); форму вертикального профиля ветра.

Значение аэродинамического коэффициента зависит, кроме того, от направления потока ветра и от отношения внутреннего давления к скоростному напору. Почти совершенно не изучено влияние динамического характера ветровой нагрузки.

В связи с изложенным не следует ожидать, что распределение ветрового давления можно рассматривать как достаточно надежно обоснованную характеристику. В самом деле, даже опубликованные в литературе результаты измерений на моделях обнаруживают значительные расхождения. Подробное рассмотрение этой проблемы выходит за рамки настоящей статьи. Мы лишь ограничимся

ссылкой на некоторые основные работы, содержащие результаты измерений на моделях оболочек следующих форм:

полусфера — [4, 20];

полуцилиндр со сферическими торцами — [16, 20, 26];

полуцилиндр на прямоугольном плане — [5, 20];

пологая цилиндрическая оболочка с закругленными торцами — [16];

то же, на прямоугольном плане — [20].

Для рассматриваемых в настоящей статье цилиндрических оболочек (более подробно их поведение при ветровой нагрузке обсуждается ниже) наблюдается следующая закономерность [20]. В верхней средней части оболочки распределение аэродинамического коэффициента соответствует показанному на рис. 1. Это распределение характеризуется тремя основными значениями коэффициента c : $c_{\max}$ (максимальное давление), $c_{\min}$ (максимальный отсос) и c_N (отсос «за потоком»), а также значением центрального угла ω для «нулевой» точки эпюры давления. Эти значения зависят от отношения внутреннего давления к скоростному напору p_i/q , направления ветра (угла γ), формы торцов оболочки и отношения высоты оболочки к ее радиусу h/r .

С увеличением отношения p_i/q центральный угол ω незначительно уменьшается, т. е. сокращается размер зоны напора (например, для полуцилиндра $\omega = 55^\circ$ при $p_i/q = 0,4$ и $\omega = 45^\circ$ при $p_i/q = 0,9$). Интенсивность «пики» отсоса $c_{\min}$ оказывается несколько выше для оболочки с закругленными торцами, чем при прямоугольном плане (посередине длины оболочки при $\gamma = 30^\circ$ значения $c_{\min}$ равны соответственно — 2,65 и — 2,25). С уменьшением отношения h/r интенсивность отсоса также уменьшается (для оболочки на прямоугольном плане при $\gamma = 30^\circ$ $c_{\min} = -2,25$ при $h/r = 1$ и $c_{\min} = -1,90$ при $h/r = 0,75$). Приведенные выше значения заимствованы из работы [20], где установлено, что наиболее неблагоприятным является действие ветра на оболочку под углом $\gamma = 30^\circ$. Аналогичные результаты получены в работе [16], где исследовались цилиндрические оболочки со сферическими торцами при отношениях высоты к радиусу, равных 1,0 и 0,65. В этой работе, однако, установлено, что наиболее неблагоприятным является действие ветра при $\gamma = 15^\circ$, а также получены другие, частично более высокие, значения интенсивности ветрового давления. При направлении ветра вдоль оболочки давление на ее поверхности оказывается значительно меньше по величине и распределяется более равномерно, без выраженных «пиков».

Распределение ветрового давления у торцов оболочки не подчиняется столь простым закономерностям; в общем можно лишь констатировать, что «пики» отсоса смещаются в подветренную сторону, а их интенсивность становится значительной.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что на нынешнем уровне наших знаний не представляется возможным дать универсальные рекомендации по назначению ветровой нагрузки. Незвестна функциональная зависимость распределения аэродинамических коэффициентов от таких факторов, как отношение внутреннего

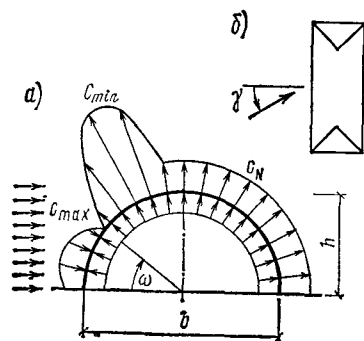


Рис. 1. Действие внутреннего давления и ветра

а — типичное распределение аэродинамического коэффициента; б — угол направления ветра

Рис. 2. Механическое поведение нитей из политетрафторэтиленового волокна [19]

а — диаграммы «усилие—удлинение» при кратковременном нагружении (скорость деформирования 25 %/мин); б — изохронные диаграммы «усилие—удлинение» при температуре 23 °С

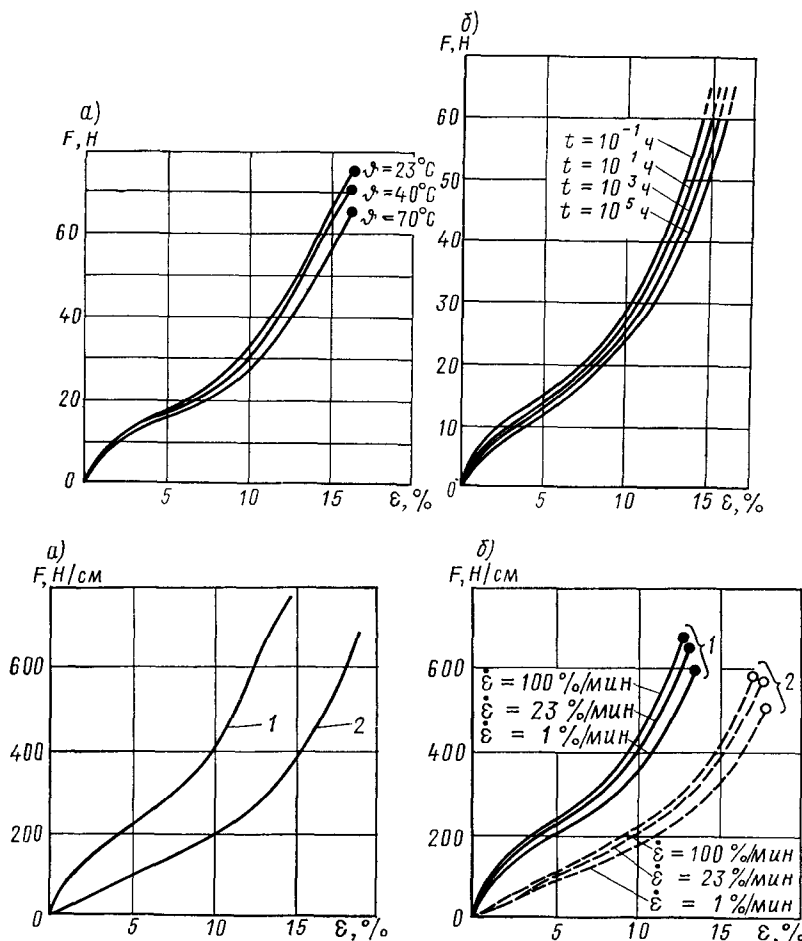


Рис. 3. Механическое поведение ткани с покрытием [19]

а — при кратковременных испытаниях; б — в зависимости от скорости деформирования; 1 — основа; 2 — уток

давления к скоростному напору, направление ветра, форма оболочки; поэтому невозможно и однозначное аналитическое описание такого распределения. Кроме того, ветровая нагрузка зависит еще и от перемещений оболочки, т. е. является неконсервативной. Таким образом, расчет воздухоопорной оболочки на ветровую нагрузку должен выполняться особо для каждого конкретного случая; распространять результаты этого расчета на иные условия следует с надлежащей тщательностью, имея в виду возможную потерю точности.

4. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

Ткани, применяемые для воздухоопорных оболочек, отличаются весьма сложным механическим поведением. Наиболее распространены ткани с поливинилхлоридным покрытием (ПВХ); начинают применять также стеклоткани, покрытые тефлоном (ПТФЭ) [1]. Многообразие видов выпускаемых тканей с покрытием из ПВХ обуславливает различие их индивидуальных свойств, из которых здесь будут в общей форме рассмотрены лишь наиболее важные. Более детальные сведения можно найти в литературе [18, 19, 24, 25, 27].

Механическое поведение отдельных нитей ткани при постоянной скорости деформации и различных температурах испытания показано на рис. 2, а; при длительном действии нагрузки и постоянной температуре — на рис. 2, б. Удлинения при длительной нагрузке с хорошим приближением выражаются линейной зависимостью от логарифма времени [19].

Механическое поведение ткани без покрытия в общем аналогично поведению отдельных нитей; различие свойств ткани по основе и утку определяется технологическим процессом ее изготовления. При этом полное удлинение ткани складывается из собственно удлинения и из вытяжки нитей, получивших искривление (волнистость) при изготовлении ткани; последний эффект сильнее проявляется при небольших нагрузках. Естественно, что удлинение ткани в направлении утка оказывается намного больше, чем вдоль основы, как видно на рис. 3. Ткань без покрытия практически не обладает жесткостью при сдвиге и характеризуется ярко выраженной ортотропией в направлениях основы и утка.

На рис. 3, а показаны диаграммы «усилие—удлинение» для ткани с покрытием (по основе и утку) при кратковременном испытании на одноосное растяжение [19]. Характер обеих кривых сходен с аналогичными зависимостями для отдельных нитей и для ткани покрытия. Влияние температуры также проявляется аналогично тому, как это имеет место для отдельных нитей (см. рис. 2, а) [19]. Влияние скорости деформации на механическое поведение ткани показано на рис. 3, б. Во всех случаях при кратковременном испытании на одноосное растяжение обнаруживается ярко выраженная физическая нелинейность материала; это остается справедливым и при двухосном растяжении, причем в данном случае характер кривых «уси-

вильно, иногда в отдельных частях конструкции могут появиться вызванные несовершенством расчетной модели «белые пятна», которые следует надлежащим образом расшифровать, чтобы не прийти к ложным выводам из результатов расчета. При этом в отдельных случаях может оказаться необходимым произвести повторный расчет, если для наиболее напряженных частей конструкции получены слишком сомнительные данные. Этот вопрос рассмотрен более подробно в п. 6.4

В заключение кратко остановимся на весьма приближенных методах расчета, широко применявшихся в прошлом. При использовании этих методов воздухоопорная конструкция расчленяется на составные части (цилиндр, сферические торцы), каждая из которых рассчитывается отдельно: цилиндрическая часть — приближенно по теории нерастяжимой нити [23], сферические части — по линейной мембранной теории. При этом не выполняются условия совместности в переходных зонах оболочки, степень точности определения усилий и перемещений не поддается строгой оценке, а напряженное состояние оболочки в направлении образующих цилиндра вообще не может быть рассчитано. При наличии имеющейся в настоящее время вычислительной техники подобные грубые методы расчета уже непригодны, за редкими исключениями. Логично поэтому, что по нормам ФРГ [32] требуется производить расчеты пневматических оболочек по нелинейной теории, с учетом условий совместности.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

6.1. Исходные данные. Исследованы два типа конструкций, представленные на рис. 5: полуцилиндрические оболочки с полусферическими (тип 1) и полуцилиндрическими (тип 2) торцами; в обоих случаях принято $b/l=0,40$ и $h/r=1,0$. Основной целью проведенных расчетов была оценка различия в напряженно-деформированном состоянии оболочек с различным очертанием торцов.

Материал оболочек принят линейно-упругим, состоящим из двух слоев — ортотропной ткани и изотропного покрытия. Упругие характеристики слоев (модули упругости E и коэффициенты поперечной деформации ν) приняты равными: для ткани $E=108,4$ кН/см² (по основе) и $E=28,4$ кН/см² (по утку), $\nu=0$; для покрытия $E=11,6$ кН/см²; $\nu=0,45$.

Численный расчет выполнялся в предположении совместной деформации слоев; толщина каждого из слоев принята равной 0,6 мм.

Значения указанных выше характеристик не «привязаны» к какому-либо конкретному материалу, а скорее типичны для целого класса применяемых на практике материалов, причем эти значения примерно соответствуют экспериментальным данным, приведенным в работе [24]. Ориентация ткани принята в расчете таким образом, чтобы нити основы располагались в кольцевом направлении, а нити утка — в продольном.

Собственный вес g оболочки в расчете не учитывался, поскольку его влияние в рассматриваемом случае весьма незначительно.

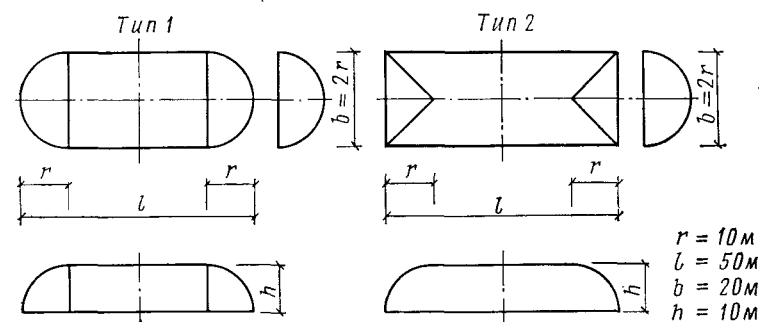


Рис. 5. Исследованные формы цилиндрических оболочек

Среднее значение внутреннего давления p_i принято равным 0,30 кН/м²; для скоростного напора ветра q принято три значения — 0,375, 0,50 и 0,75 кН/м², что соответствует значениям отношения p_i/q , равным 0,8, 0,6 и 0,4. Для оболочки типа 2 были дополнительно проведены исследования еще при значениях внутреннего давления 0,45 и 0,60 кН/м² и соответствующих значениях p_i/q , так что всего было исследовано девять различных сочетаний нагрузок. Для оболочки типа 1 к настоящему моменту дополнительно исследовано сочетание $p_i=0,45$ кН/м² и $q=0,75$ кН/м², так что в данном случае общее число исследованных сочетаний нагрузок равно четырем. Сводка всех сочетаний нагрузок дана в табл. 1. Эти сочетания были приняты с таким расчетом, чтобы оценить влияние изменения интенсивности каждой из нагрузок p_i и q при неизменном отношении p_i/q . Значение скоростного напора ветра q было во всех случаях принято постоянным по высоте.

Распределение ветрового давления по поверхности оболочек было принято на основе результатов испытания моделей, приведенных в работе [20]. Соответствующие эпюры давления для оболочки типа 1 (при поперечном направлении ветра) приведены в работе [8], а для оболочки типа 2 (при поперечном и «косом» ветре, соответ-

Таблица 1 Исследование сочетания нагрузок

p_i/g	Нагрузки, кН/м ²					
	p_i	q	p_i	q	p_i	q
Оболочка типа 1						
0,4	0,30	0,75	—	—	—	—
0,6	0,30	0,50	0,45	0,75	—	—
0,8	0,30	0,375	—	—	—	—
Оболочка типа 2						
0,4	0,30	0,75	0,45	1,125	0,60	1,50
0,6	0,30	0,50	0,45	0,75	0,60	1,00
0,8	0,30	0,375	0,45	0,5625	0,60	0,75

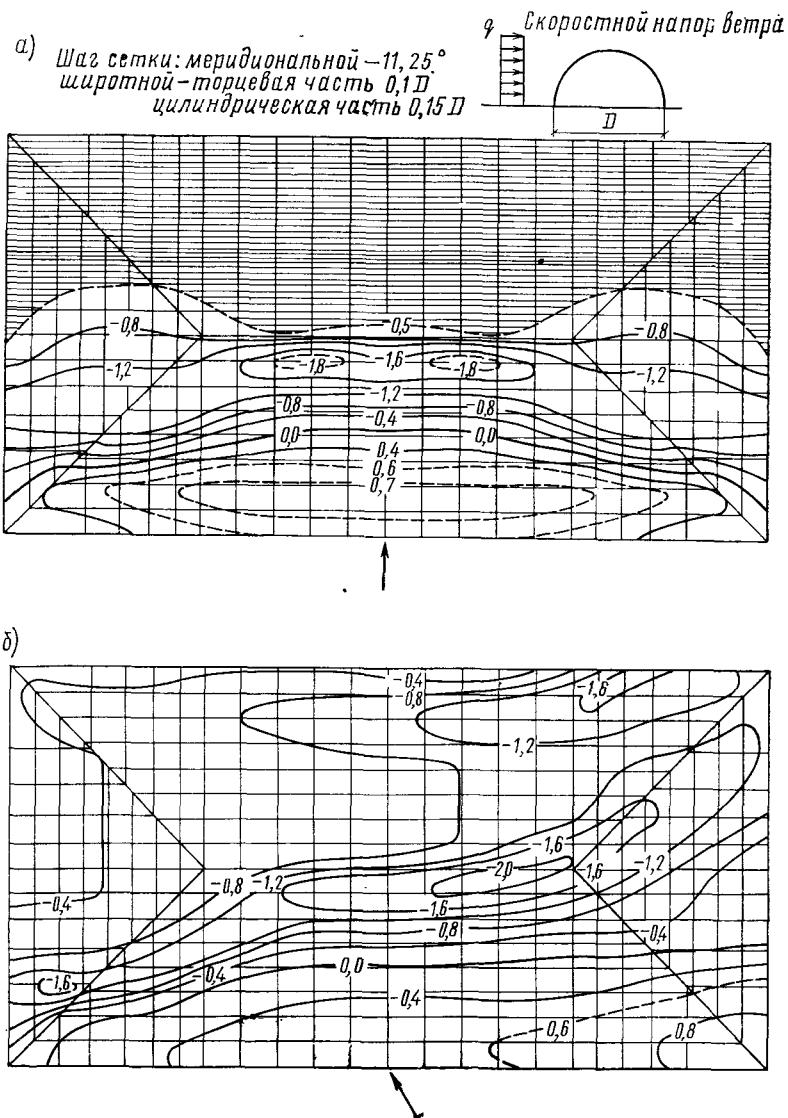


Рис. 6. Распределение ветрового давления по поверхности оболочки типа 2 [20]
а — при поперечном ветре ($\gamma=0^\circ$); б — при «косом» ветре ($\gamma=30^\circ$)

ственно при $\gamma=0$ и $\gamma=30^\circ$) показаны на рис. 6. Эти эпюры давления были приняты постоянными для всех сочетаний нагрузок, хотя в действительности они зависят также от отношения p_i/q .

Все численные расчеты были выполнены по системе программ MESY [11]. При этом были использованы треугольные плоские конечные элементы («элементы постоянного удлинения»): для обо-

лочки типа 1—1614 элементов с 849 узлами, для оболочки типа 2—1024 элемента с 561 узлом. Расчет на внутреннее давление и на поперечный ветер в силу симметрии системы был произведен только для одной половины сети конечных элементов. Сеть для оболочки типа 2 показана (в вертикальной проекции) на рис. 7.

Подобное описание процедуры расчета по МКЭ можно найти в работах [8, 12], поэтому останавливаться на ней мы не будем. При расчете в качестве исходной была принята «идеальная» форма оболочки в соответствии с рис. 8; затем оболочка «нагружалась» внутренним давлением p_i и к полученной новой равновесной форме оболочки прикладывалась ветровая нагрузка полной расчетной интенсивности. Окончательная равновесная форма оболочки определялась путем итераций. Если по расчету в каком-либо конечном элементе появлялись сжимающие напряжения, то он рассматривался как ненапряженный и не передающий усилий. На каждом шаге итерационного процесса осуществлялась перепроверка напряженного состояния таких «холостых» элементов, и при изменении знака напряжения они вновь включались в систему. Рассчитанные таким образом значения усилий и перемещений частично приведены в двух последующих разделах; обозначения усилий показаны на рис. 8.

Все расчеты были выполнены на ЭВМ TR 440 вычислительного центра Рурского университета в Бохуме при участии дра-инж. Б. Хартмана, дра-инж. Х.-Ю. Нимана и инж. З. Саналья. Анализ и графическая обработка результатов расчетов выполнены с помощью инж. Г. Брейцке и Дриллинга.

6.2. Типичное распределение усилий

6.2.1. Оболочка типа 1 при поперечном ветре. На рис. 9 показаны эпюры кольцевых усилий n_ϕ и продольных усилий n_θ в средней части оболочки. Кольцевые усилия почти постоянны по сечению, что соответствует расчету по теории нерастяжимой нити. Совершенно иначе обстоит дело с продольными усилиями n_θ . Если при внутреннем давлении p_i они почти постоянны по сечению, то при наложении ветровой нагрузки w эти усилия резко возрастают в верхней части оболочки и уменьшаются вблизи опорного контура. Изменение усилий имеет в общем достаточно плавный характер; это свидетельствует о том, что торцы мало влияют на напряженное состояние оболочки в ее средней части.

Влияние торцов четко обнаруживается на рис. 10, где показаны эпюры усилий на расстоянии около 2 м от торца. В этой зоне кольцевые усилия в общем уменьшаются, особенно с наветренной стороны, а продольные усилия в верхней части оболочки, наоборот, заметно возрастают; в целом распределение усилий становится значительно менее равномерным. Усилия n_ϕ и n_θ от одного только внутреннего давления остаются практически неизменными. На напряженном состоянии оболочки у самой границы ее цилиндрической части, естественно, сильно сказывается влияние торца, как вид-

но из рис. 11. Возрастание продольных усилий n_ϕ в верхней части оболочки обусловлено значительным приростом усилий n_ϕ в сферическом торце. Что касается самого торца, то его напряженное состояние, если не считать локальных эффектов, типично для сферических оболочек: усилия n_ϕ концентрируются в окрестности полюса,

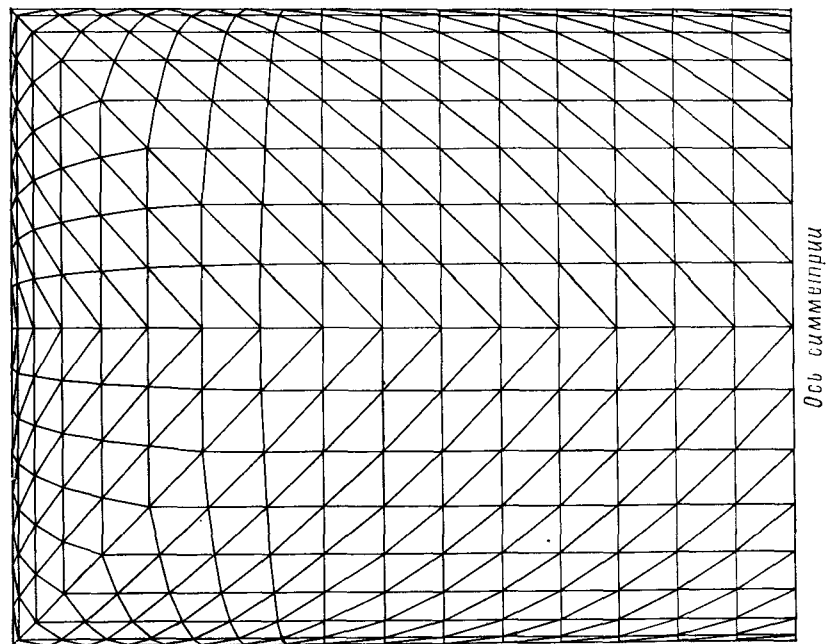


Рис. 7. Сеть конечных элементов для оболочки типа 2

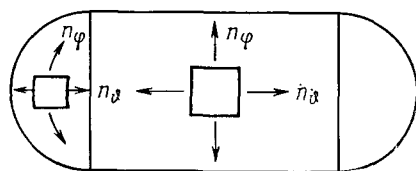


Рис. 8. Обозначения усилий в оболочке

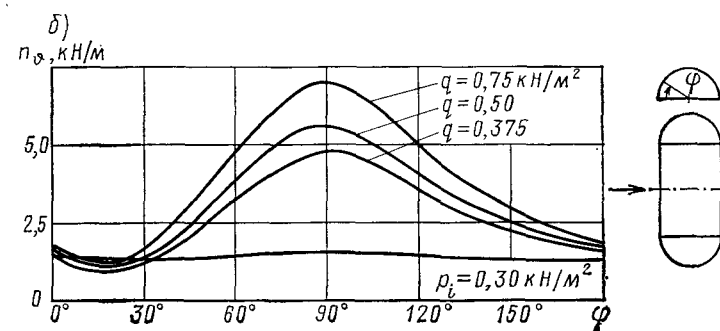
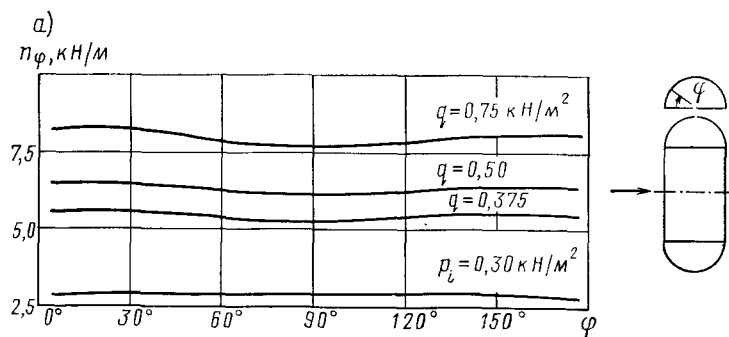


Рис. 9. Усилия в средней части оболочки типа 1 при внутреннем давлении 0,30 кН/м²

а — кольцевые; б — продольные

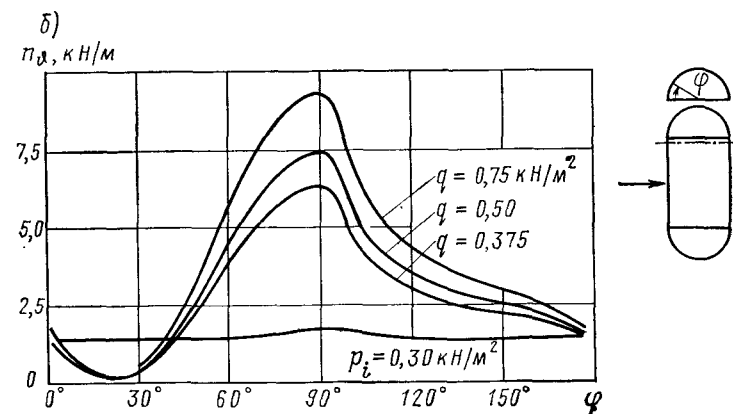
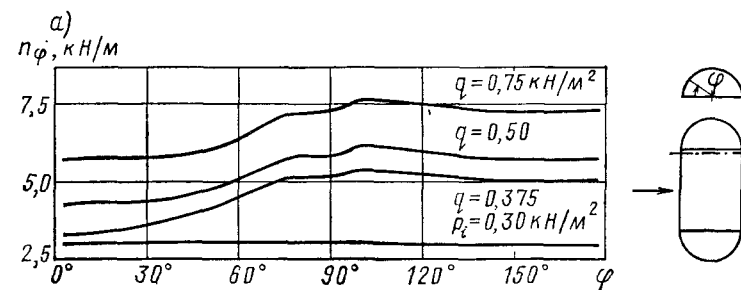


Рис. 10. Усилия у торца оболочки типа 1 при внутреннем давлении 0,30 кН/м²

а — кольцевые; б — продольные

а усилия n_ϕ играют лишь второстепенную роль. «Скачок» в усилиях n_ϕ на рис. 11 является следствием изменения усилий, вызванного внутренним давлением. Приведенные рисунки соответствуют внутреннему давлению $p_i = 0,30$ кН/м²; они опубликованы в рабо-

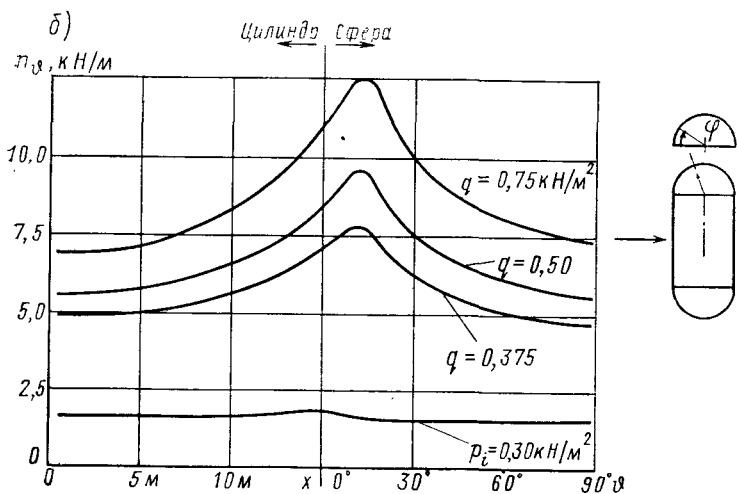
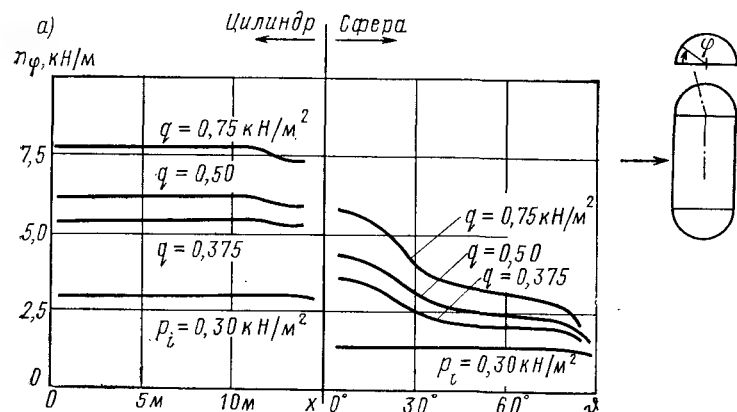


Рис. 11. Усилия в продольном сечении оболочки типа 1 при внутреннем давлении 0,30 кН/м²

а — кольцевые; б — продольные

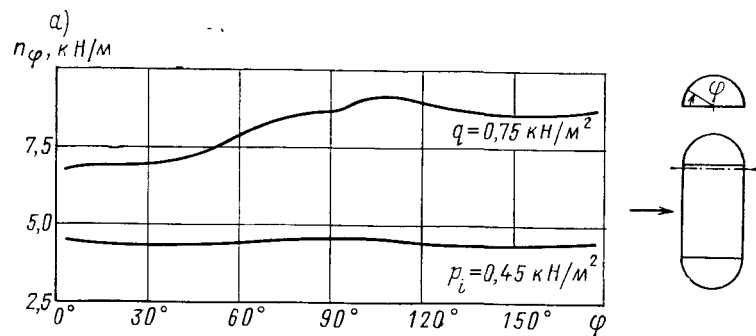


Рис. 12. Усилия у торца оболочки типа 1 при внутреннем давлении 0,45 кН/м²

а — кольцевые; б — продольные

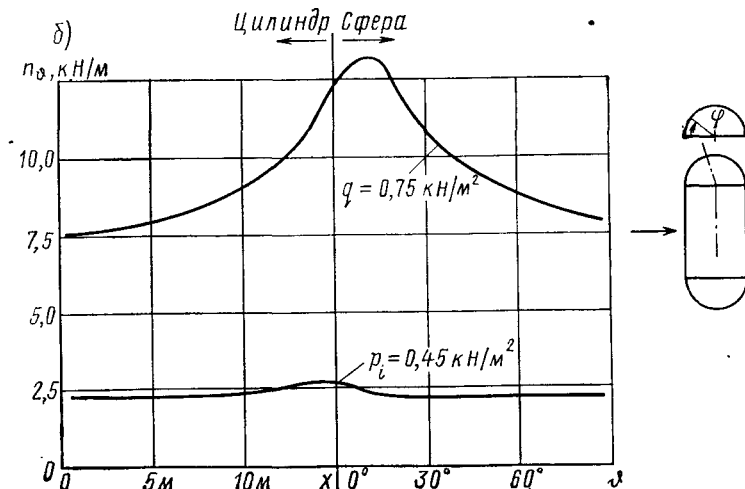
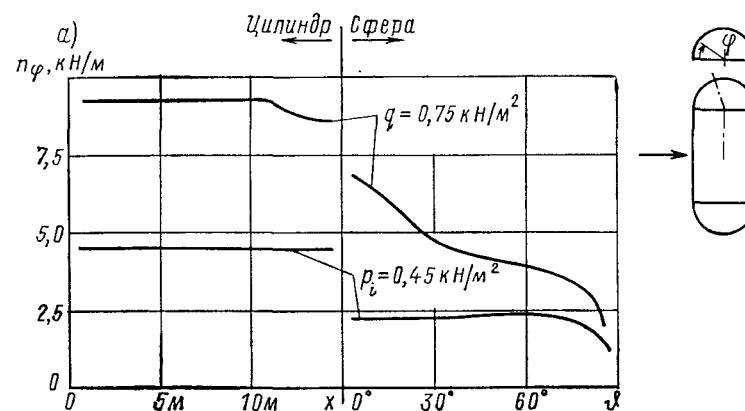
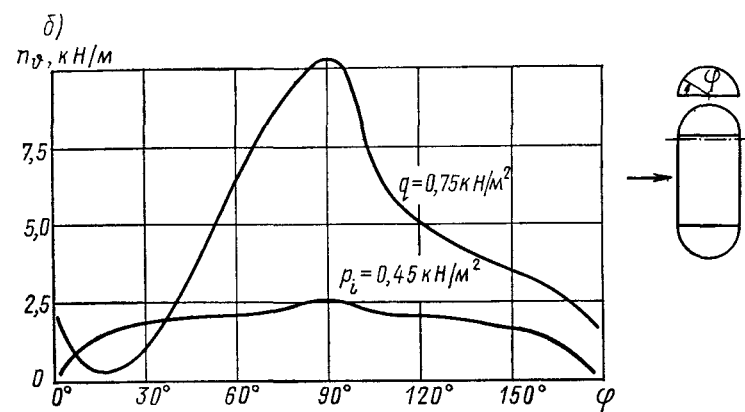
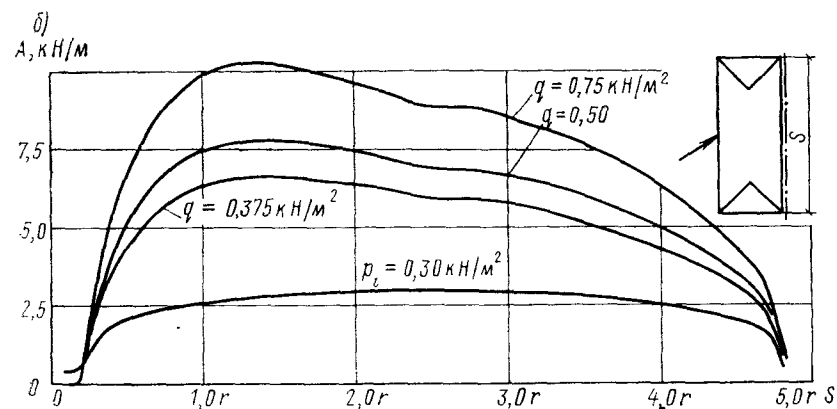
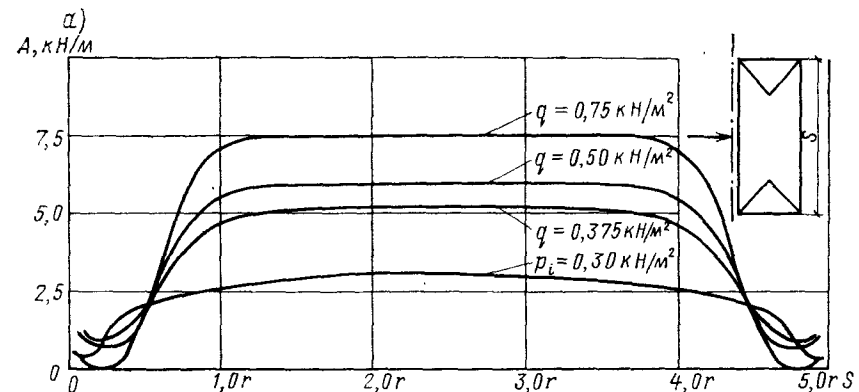
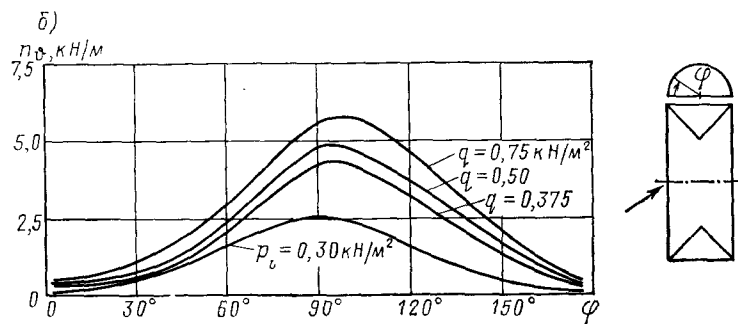
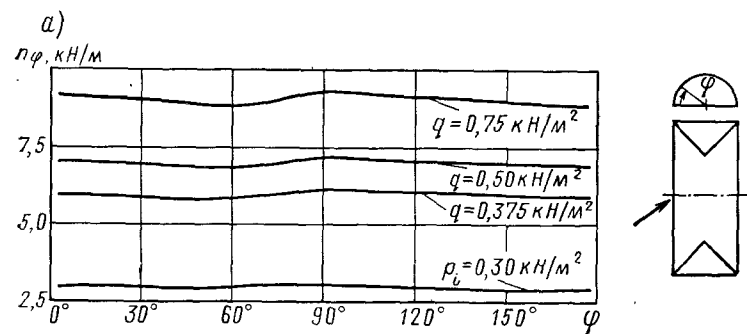
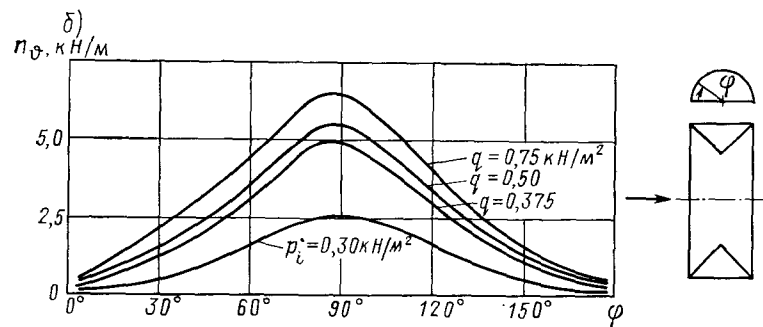
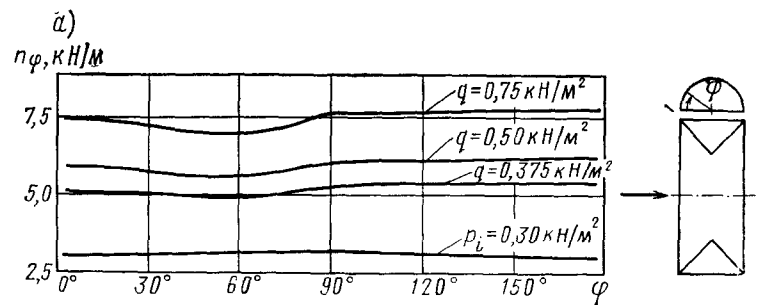


Рис. 13. Усилия в продольном сечении оболочки типа 1 при внутреннем давлении 0,45 кН/м²

а — кольцевые; б — продольные

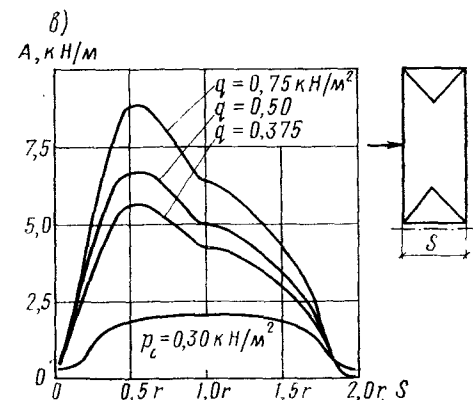


14а	15а
116	156
16а	15в
106	

Рис. 14. Усилия в средней части оболочки типа 2 при внутреннем давлении $0,30 \text{ кН/м}^2$
 а — кольцевые; б — продольные

Рис. 15. Усилия A в опорном контуре оболочки типа 2 при внутреннем давлении $0,30 \text{ кН/м}^2$ и поперечном ветре
 а — с наветренной стороны; б — с подветренной стороны; в — в торце

Рис. 16. Усилия в средней части оболочки типа 2 при внутреннем давлении $0,30 \text{ кН/м}^2$ и «косом» ветре
 а — кольцевые; б — продольные



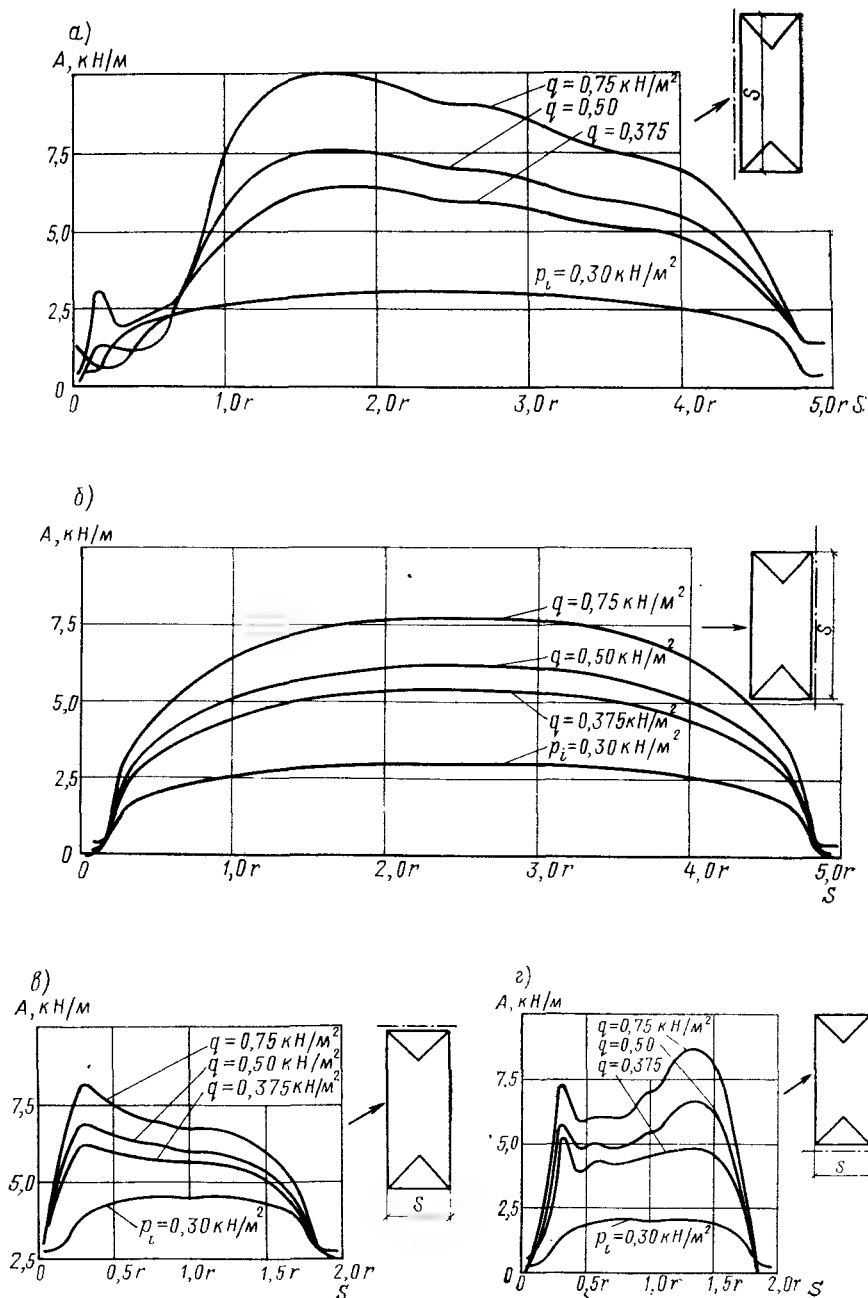


Рис. 17. Усилия A в опорном контуре оболочки типа 2 при внутреннем давлении и «косом» ветре

a — с наветренной стороны; $б$ — с подветренной стороны; $в$ — в левом торце; $г$ — в правом торце

те [8]. Для полноты на рис. 12 и 13 приведены еще несколько эпюр усилий, рассчитанных при внутреннем давлении $p_i = 0,45$ кН/м² и скоростном напоре ветра $q = 0,75$ кН/м².

6.2.2. Оболочка типа 2 при поперечном ветре. Кольцевые и продольные усилия в средней части оболочки показаны на рис. 14. Их эпюры имеют плавный характер и аналогичны соответствующим эпюрам для оболочки типа 1 (см. рис. 9); различие имеется лишь в усилиях n_ϕ от внутреннего давления. Усилия в опорном контуре показаны на рис. 15. В средней части длины оболочки они распределены очень равномерно и сильно убывают только у торцов. В этих местах появляются ненапряженные зоны оболочки, которые можно наблюдать и на моделях. Наибольшие по абсолютной величине усилия в опорном контуре действуют в торцах оболочки (рис. 15, в). Аналогичная картина усилий наблюдается и при более высоких значениях нагрузок p_i и q .

6.2.3. Оболочка типа 2 при «косом» ветре. Распределение усилий в оболочке типа 2 при «косом» ветре (рис. 16) в общем аналогично распределению усилий при поперечном ветре. При этом усилия n_ϕ заметно возрастают, а усилия n_ψ незначительно уменьшаются. Сильно возрастают также усилия в опорном контуре, причем максимума они достигают на подветренной стороне цилиндрической части оболочки. Усилия в опорном контуре торцов меньше по величине и сравнимы с усилиями от поперечного ветра (рис. 17).

6.2.4. Усилия от внутреннего давления. Для всех исследованных случаев были рассчитаны усилия в оболочках от одного только внутреннего давления. Если представить эти усилия в форме

$$n_\phi(p_i) = \beta p_i r, \quad (6.1)$$

где p_i — внутреннее давление, r — радиус оболочки,

то безразмерный «коэффициент внутреннего давления» выражается в виде

$$\beta = n(p_i)/(p_i r), \quad (6.2)$$

где r — радиус недеформированной оболочки; для цилиндрических частей оболочек обоих типов и для сферических торцов оболочки типа 1 он принят равным 10 м.

Торцы оболочки типа 2 имеют переменный радиус кривизны. Для единообразия целесообразно отнести все усилия к постоянному радиусу цилиндрической части. Как видно из рис. 9—13, усилия $n(p_i)$ и, следовательно, коэффициент β являются переменными величинами, хотя изменяются и не очень сильно.

6.2.5. Усилия от ветровой нагрузки. Как указано в начале раздела 6, усилия в оболочке могли быть рассчитаны только от ветровой нагрузки w в сочетании с внутренним давлением p_i . Для определения усилий, вызываемых одной только ветровой нагрузкой, необходимо поэтому ввести некоторые допущения, обусловленные еще и тем, что ветровой нагрузке соответствует измененная геометрическая форма оболочки, для которой усилия от дополнительного приложенного внутреннего давления могут отличаться от усилий, вызываемых одним только внутренним давлением.

Используем обычную линейную зависимость

$$n(w + p_i) = n(w) + n(p_i), \quad (6.3)$$

согласно которой суммарное усилие от ветровой нагрузки и внутреннего давления складывается аддитивно из усилий от каждой из этих нагрузок. Тогда, применяя подстановку, аналогичную (6.1)

$$n(w) = \alpha q r, \quad (6.4)$$

имеем

$$n(w + p_i) = \alpha q r + n(p_i), \quad (6.3a)$$

откуда получаем безразмерный «коэффициент ветровой нагрузки»

$$\alpha = \frac{n(w + p_i) - n(p_i)}{q r}. \quad (6.5)$$

Подставляя в выражение (6.5) значения усилий от внутреннего давления $n(p_i)$, можно определить коэффициент α ; тогда, с учетом формулы (6.1), получим окончательное выражение для суммарных усилий в оболочке:

$$n(w + p_i) = \alpha q r + \beta p_i r. \quad (6.6)$$

Способ определения коэффициентов α и β покажем на примере. Численным расчетом получены следующие значения усилий, кН/м, в верхней средней части оболочки типа 1 (см. рис. 9):

при $q = 0,375$ кН/м ²	$n_\varphi(w + p_i) = 5,35;$ $n_\theta(w + p_i) = 4,87;$
при $q = 0,50$ кН/м ²	$n_\varphi(w + p_i) = 6,17;$ $n_\theta(w + p_i) = 5,60;$
при $q = 0,75$ кН/м ²	$n_\varphi(w + p_i) = 7,82;$ $n_\theta(w + p_i) = 6,93.$

Вычитая из приведенных значений $n_\varphi(p_i) = 3,00$ кН/м и $n_\theta(p_i) = 1,62$ кН/м, находим значения усилий $n_\varphi(w)$ и $n_\theta(w)$, а по ним, пользуясь формулой (6.4), следующие значения α :

при $q = 0,375$ кН/м ²	$\alpha_\varphi = 0,628;$ $\alpha_\theta = 0,866;$
при $q = 0,50$ кН/м ²	$\alpha_\varphi = 0,634;$ $\alpha_\theta = 0,796;$
при $q = 0,75$ кН/м ²	$\alpha_\varphi = 0,643;$ $\alpha_\theta = 0,708,$

а также значения β : $\beta_\varphi = 1,00$; $\beta_\theta = 0,54$. Как видно, значения α_θ сильно зависят от скоростного напора q ; на значения α_φ он почти не влияет. То же относится и к соответствующим значениям n_φ и n_θ . Полные эпюры коэффициентов α и β для зоны оболочки, показанной на рис. 9, приведены на рис. 18; эпюры построены без учета слабой зависимости $\alpha_\varphi = f(q)$. Для обоих типов оболочек на основании рис. 9 и 11 может быть установлена следующая общая тенденция. В средней зоне цилиндрической части оболочки практически постоянно значение α_φ ; вблизи торцов, наоборот, прекращается изменение значений n_φ . Там, где n_φ принимает наибольшее значение, α_φ почти постоянно и не зависит от q , а при малых значениях

усилий эта зависимость, наоборот, выражена сильнее (аналогичная тенденция существует и в сферических торцах). Коэффициент α_θ , в свою очередь, отличается значительной изменчивостью и зависит от скоростного напора q .

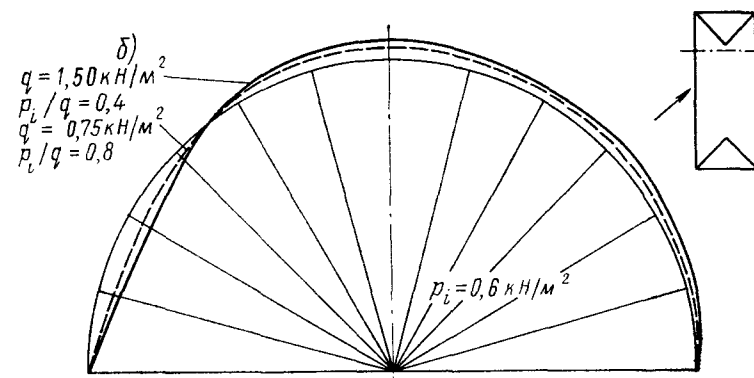
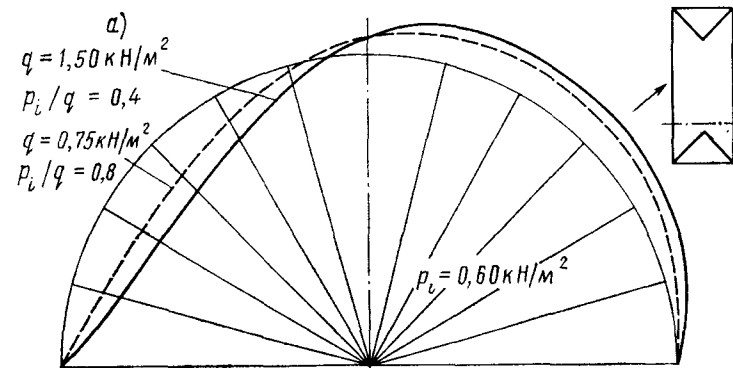
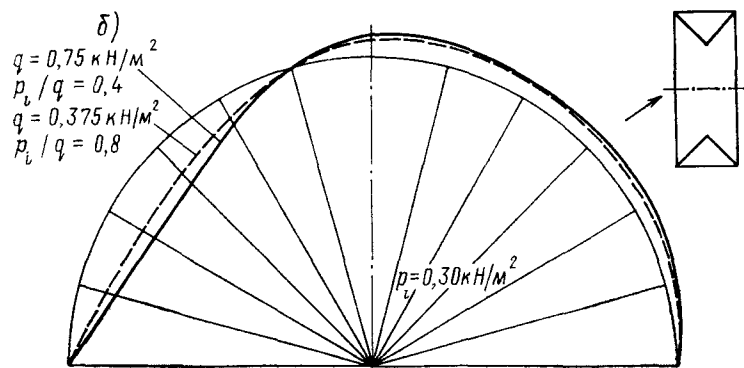
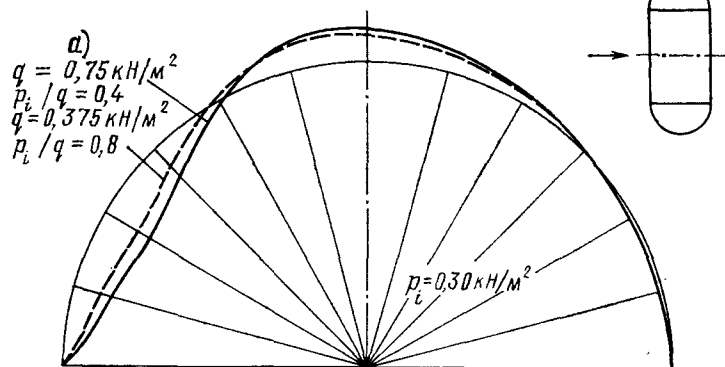
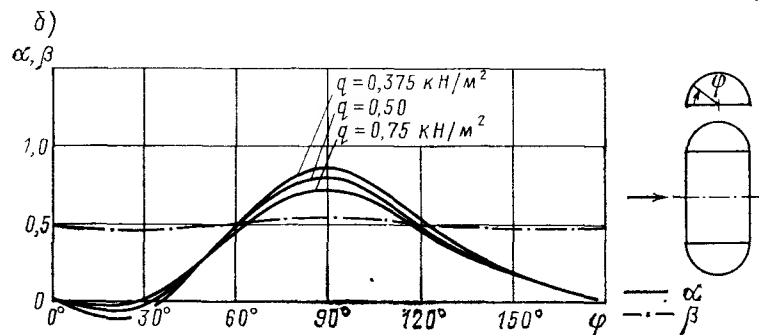
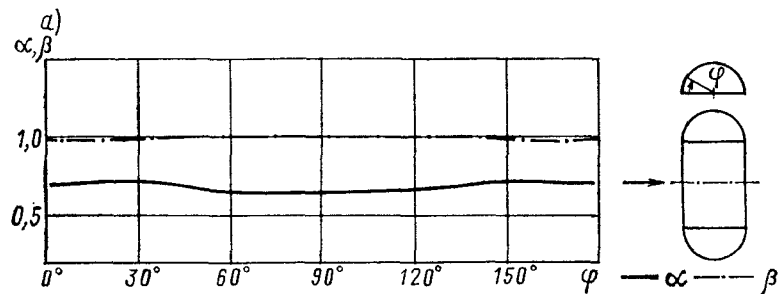
Описанный подход делает принципиально возможным определение усилий, вызываемых ветровой нагрузкой. Следует только иметь в виду, что вследствие принятых допущений о линейной суперпозиции усилий согласно выражению (6.3) и о доле усилия от p_i в суммарном усилии, полученные значения $n(w)$ оказываются недостаточно надежными. В разд. 7 предлагается поэтому иной подход для расчета усилий $n(w + p_i)$ по формуле (6.6).

6.3. Типичное распределение перемещений. На рис. 19 показаны радиальные перемещения в середине длины цилиндрической части оболочки при $p_i = 0,30$ кН/м² и двух значениях скоростного напора ветра q : 0,375 и 0,75 кН/м². При поперечном ветре эти перемещения практически одинаковы для оболочек типов 1 и 2. При «косом» ветре радиальные перемещения оболочки типа 2 больше с подветренной стороны и меньше в верхней части оболочки; с наветренной стороны они примерно одинаковы для обоих типов оболочек. Изменение радиальных перемещений по мере приближения к торцам показано на рис. 20 для оболочки типа 2 при «косом» ветре. Здесь хорошо обнаруживается влияние распределения ветрового давления (см. рис. 6, б): в области большего отсоса наблюдаются и значительно более высокие значения перемещений. Во всех случаях перемещения возрастают с увеличением скоростного напора q . Влияние интенсивности нагрузок видно из рис. 21. При одном и том же отношении p_i/q большему внутреннему давлению (и, соответственно, большему ветровому напору) соответствуют более значительные перемещения; это увеличение, однако, существенно лишь с подветренной стороны оболочки.

Интересно проследить за перемещениями в самих торцах оболочки. На рис. 22, а показаны радиальные перемещения примерно посередине торца от одного только внутреннего давления: средняя часть торца, первоначально прямолинейная, сильно искривляется. При дополнительном действии «косого» ветра в торце появляются значительные перемещения, величина которых сильно возрастает с увеличением ветрового напора (рис. 22, б). На рис. 23, а дано сравнение перемещений в торце оболочки при поперечном и «косом» ветре; на рис. 23, б показаны эпюры радиальных перемещений по длине среднего сечения оболочки типа 2.

6.4. Анализ факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние оболочек

6.4.1. Влияние формы торцов при поперечном ветре. Как показывает сравнение рис. 9 и 14, в «невозмущенной» цилиндрической части оболочек усилия в кольцевом направлении в сущности одинаковы для обоих типов. Аналогичным образом обстоит дело и с усилиями n_θ , хотя все же в оболочке типа 2 они распределены иначе, чем в оболочке типа 1, а их максимальное значение оказывается примерно вдвое больше. Эта общая закономерность сохраняется и



18a | 20a
18б | 20б
19a |
19б |

Рис. 18. Коэффициенты α и β для усилий в оболочке типа 1 при внутреннем давлении $0,30 \text{ кН/м}^2$

a — кольцевых; b — продольных

Рис. 19. Радиальные перемещения при внутреннем давлении $0,30 \text{ кН/м}^2$ в середине цилиндрической части оболочек

a — типа 1 при поперечном ветре; b — типа 2 при «косом» ветре

Рис. 20. Радиальные перемещения в цилиндрической части оболочки типа 2 вблизи торцов при внутреннем давлении $0,60 \text{ кН/м}^2$ и «косом» ветре

a — в зоне сильного отсоса; b — в зоне слабого отсоса

в окрестности торцов. В самих торцах для оболочки типа 1 наблюдается значительный рост усилий n_ϕ , тогда как усилия n_ϕ почти не изменяются. Сопоставление найденных из расчета максимальных значений усилий показывает, что в цилиндрической части оболочки

типа 1 усилия p_ϕ больше примерно на 7 %, а усилия p_θ — на 20 %, чем для оболочки типа 2; соответственно в торцах усилия p_ϕ больше примерно на 20 %, а усилия p_θ — на 45 %. Даже учитывая возможные погрешности численного расчета, можно констатировать, что в оболочке типа 1 действуют (при тех же нагрузках) более значительные усилия; в особенности это относится к усилиям p_θ . Причиной этого, наряду с различным распределением ветрового давления в оболочках типов 1 и 2, состоит в том, что в сферическом торце при ветровой нагрузке преобладающими являются меридиональные усилия, которые концентрируются в верхней части оболочки.

6.4.2. Влияние направления ветра при торцах на прямоугольном плане. Различия в напряженно-деформированном состоянии оболочки типа 2 при поперечном и продольном ветре подробно проанализированы в работе [10]; ниже мы остановимся только на важнейших результатах. Из сравнения рис. 14, а и 16, а видно, что усилия p_ϕ в цилиндрической части оболочки оказываются значительно больше при «косом» ветре, что является прямым следствием более высоких значений ветрового отсоса (см. рис. 6). Усилия p_θ , наоборот, остаются почти неизменными и даже несколько возрастают при поперечном ветре. Этот эффект обусловлен влиянием торцов, которые стабилизируют оболочку при поперечном ветре и тем самым полностью изменяют ее напряженно-деформированное состояние (см. рис. 23, а): главные напряжения действуют в верхней средней части оболочки под значительным углом к образующим, а в окрестности торцов — почти точно в направлении ϕ [10]. В работе [10] указано также на значительное уменьшение горизонтальных перемещений при поперечном ветре. Описанный эффект виден также на рис. 15 и 17: по продольным сторонам оболочки в опорном контуре действуют значительные усилия p_ϕ , и почти такие же по величине максимальные усилия действуют в опорном контуре по торцам (p_θ). На этих рисунках также хорошо видны различия в изменчивости усилий p_ϕ и p_θ при поперечном и продольном ветрах.

6.4.3. Влияние интенсивности нагрузок. Под изменением интенсивности нагрузок мы будем понимать случай, когда отношение внутреннего напора к скоростному напору ветра p_i/q остается неизменным, а абсолютные значения p_i и q возрастают. Влияние интенсивности нагрузок ранее не было известно из литературы и впервые установлено на основании проведенных в настоящей работе численных расчетов. Это влияние четко обнаруживается по радиальным перемещениям оболочки (см. рис. 21). При том же отношении p_i/q более высокие нагрузки p_i и q вызывают и более значительные перемещения. В отношении усилий наблюдается обратная закономерность. На рис. 24 и 25 показаны (в безразмерном виде) продольные усилия p_θ в цилиндрической части оболочки типа 2 при внутреннем давлении p_i , равном 0,30 и 0,60 кН/м², и постоянном отношении $p_i/q=0,6$. Указанное относительное снижение усилий с ростом нагрузки происходит уже при действии одного только внутреннего давления, причем оно особенно выражено в верхней части оболочки.

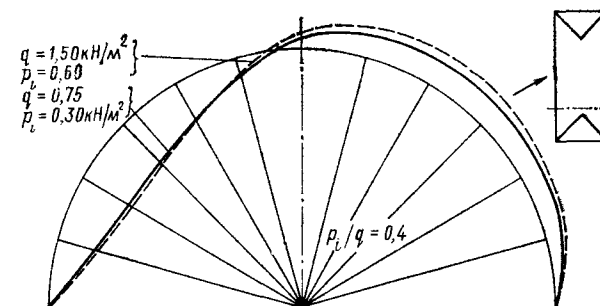


Рис. 21. Радиальные перемещения в цилиндрической части оболочки типа 2 вблизи торца при «косом» ветре

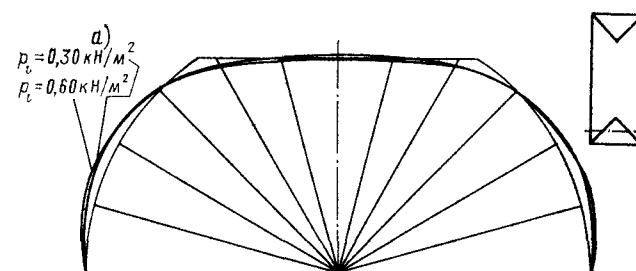
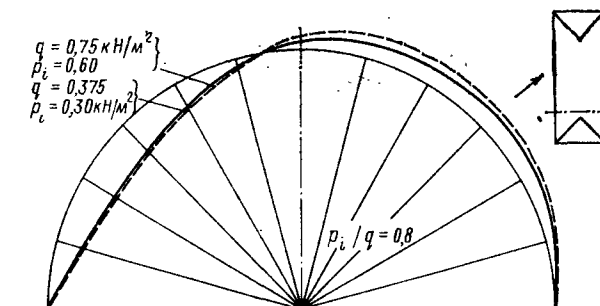
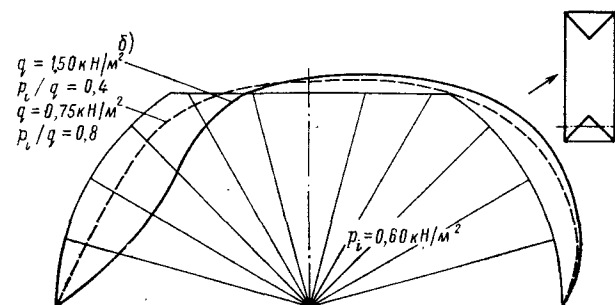


Рис. 22. Радиальные перемещения в торце оболочки типа 2

а — при внутреннем давлении; б — при внутреннем давлении и «косом» ветре



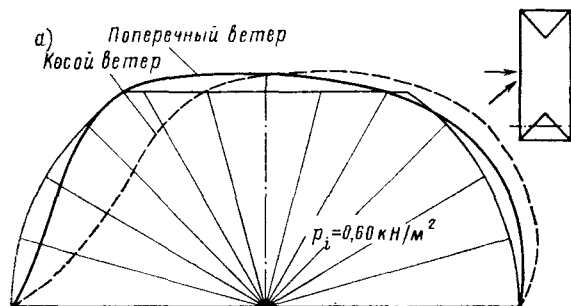
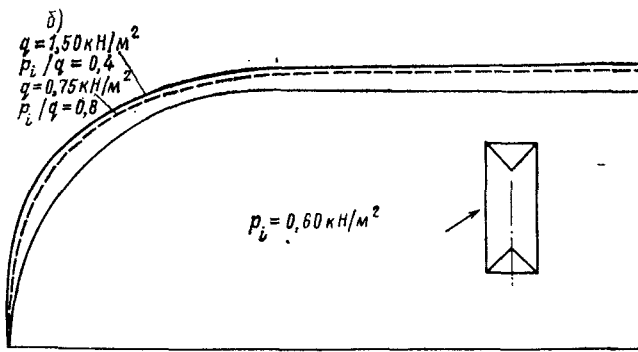


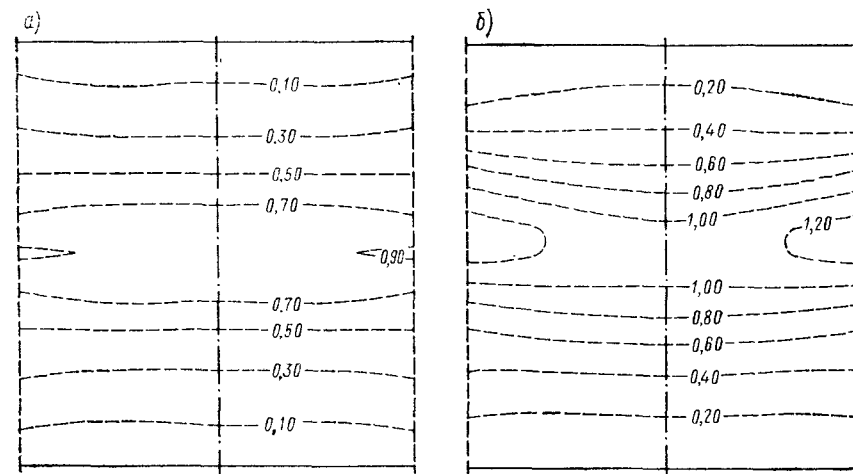
Рис. 23. Радиальные перемещения в оболочке типа 2

а — в торце при поперечном и «косом» ветре (скоростной напор 1,50 кН/м²); б — в продольном сечении при «косом» ветре



Здесь необходимо сделать четкое различие между усилиями n_ϕ и p_ϕ . Как показывает анализ, выполненный в разд. 7, влияние интенсивности нагрузок особенно сильно сказывается на усилиях p_ϕ ; для усилий n_ϕ это влияние значительно меньше, а в «невозмущенной» средней зоне цилиндрической части оболочки им можно вообще пренебречь. Не вдаваясь в подробности, можно констатировать следующее. Усилия p_ϕ в общем зависят от интенсивности нагрузки, рост которой приводит к относительному снижению этих усилий. Что касается усилий n_ϕ , то они по существу не зависят от интенсивности нагрузки; ее влияние обнаруживается лишь в небольших наиболее напряженных зонах цилиндрической части оболочки, а также в торцах. Причины этого явления следует искать в деформированном состоянии оболочки, особенно ее торцов, что как раз характерно для геометрически нелинейных систем. Как видно, например, из рис. 22, а, более высокому внутреннему давлению соответствует измененное геометрическое очертание оболочки; при приложении ветровых нагрузок напряженно-деформированное состояние оболочки снова изменяется. С ростом внутреннего давления возрастает, в частности, кривизна первоначально прямолинейных участков оболочки; при этом доля усилий n_ϕ в восприятии нагрузки увеличивается, а усилия p_ϕ снижаются.

6.4.4. Влияние растяжимости оболочки. Все расчеты оболочек в настоящей работе выполнены при характеристиках материала,



приведенных в разд. 6.1. Поскольку данные расчета при других характеристиках материала отсутствуют, точно установить их влияние на усилия и перемещения не представляется возможным. Для грубой оценки роли жесткости оболочки при растяжении был произведен параллельный расчет кольцевых усилий в оболочке по теории гибкой нити; для этого использована приведенная в п. 2.5 система уравнений упрощенной геометрически нелинейной теории круговой нити 1-го порядка. При действии внутреннего давления

$$p_\phi = 0; \quad p = -p_i \quad (6.7)$$

решение этой системы находится в замкнутом виде. Кольцевое усилие определяется при этом из кубического уравнения

$$n_\phi^3 \frac{\bar{\varphi}}{D} + n_\phi^2 \frac{\bar{\varphi}^3}{24} = r p_i^2 \frac{\bar{\varphi}^3}{24}, \quad (6.8)$$

где $\bar{\varphi}$ — центральный угол раскрытия оболочки.

На рис. 26 показаны приведенные значения усилий $\bar{n}_\phi = n_\phi / p_i r$ в зависимости от приведенной жесткости оболочки $\bar{D} = D / p_i r$ для трех значений угла $\bar{\varphi}$: 90, 180 и 270°. С увеличением жесткости зна-

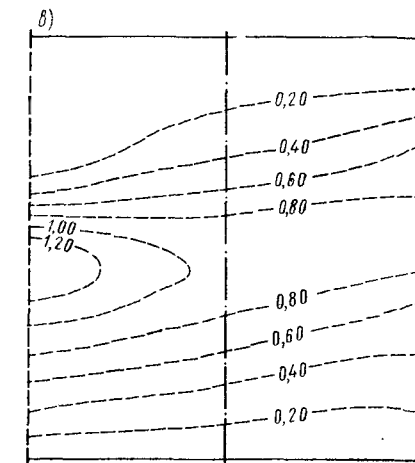


Рис. 24. Продольные усилия в цилиндрической части оболочки типа 2 при внутреннем давлении 0,30 кН/м² и скорости напора ветра 0,50 кН/м²

а — только при внутреннем давлении; б — при поперечном ветре; в — при «косом» ветре

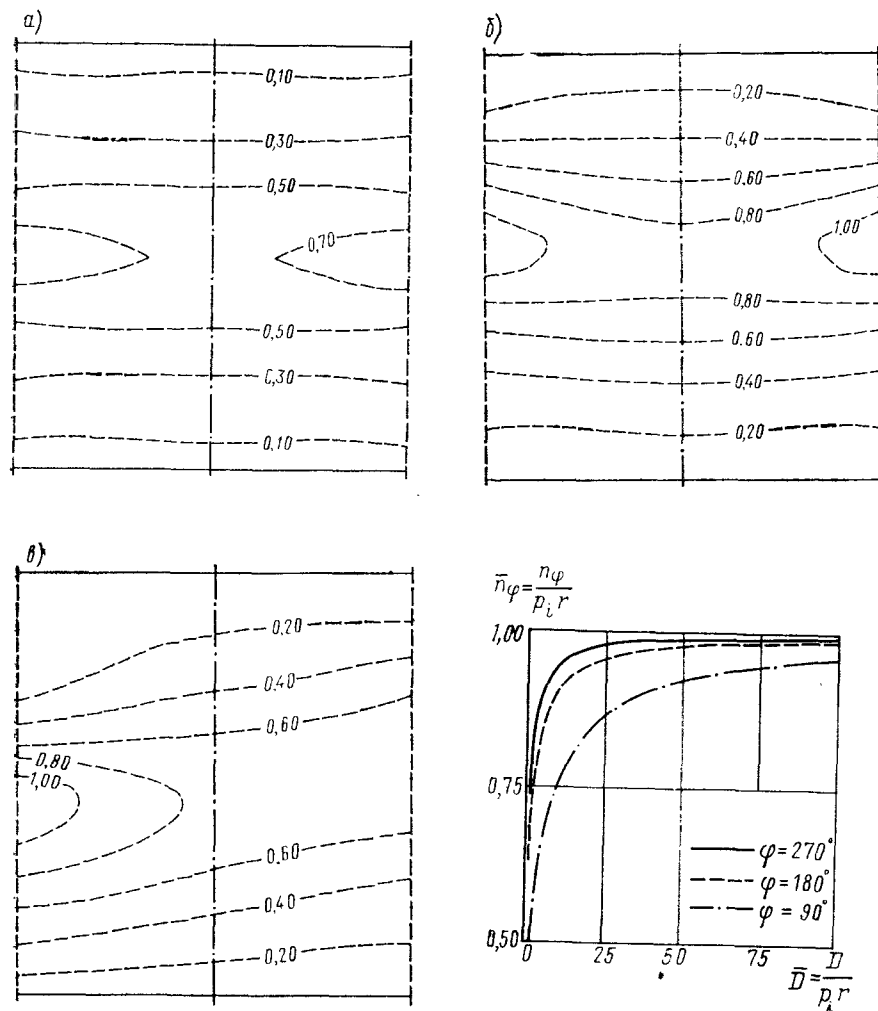


Рис. 25. Продольные усилия в цилиндрической части оболочки типа 2 при внутреннем давлении 0,60 кН/м² и скоростном напоре ветра 1,00 кН/м²

а — только при внутреннем давлении; б — при поперечном ветре; в — при «косом» ветре

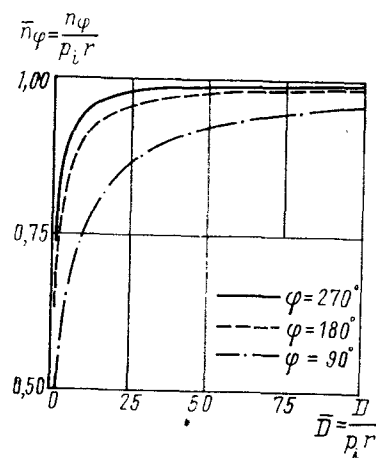


Рис. 26. Зависимость кольцевых усилий в гибкой нити от ее жесткости при растяжении

чения усилий $\bar{n}_\varphi$ приближаются к предельному значению, соответствующему нерастяжимой нити: $n_\varphi = 1$ или $n_\varphi = p_i r$. Существенные отклонения от этого значения появляются лишь при малых значениях жесткости $\bar{D}$ и малых углах раскрытия $\bar{\varphi}$. При значениях характеристик материала, приведенных в разделе 6.1, радиусе оболочки $r = 10$ м и внутреннем давлении $p_i = 0,30$ кН/м² приведен-

ная жесткость оболочки при растяжении равна $\bar{D} = 246$. Согласно рис. 26 при этом $\bar{n}_\varphi \approx 1,0$ и $n_\varphi \approx 3,0$ кН/м (предельное значение для нерастяжимой нити). Только при достаточно больших значениях внутреннего давления p_i или радиуса оболочки r приведенная жесткость $\bar{D}$ возрастает настолько, чтобы можно было учитывать снижение усилия n_φ .

Интересно еще сравнить результаты расчета на основе теорий жесткой нити 1-го и 2-го порядка (см. раздел 2.5). При нагрузке вида (6.7) по теории 2-го порядка также получается замкнутое решение, причем усилие n_φ определяется из кубического уравнения

$$n_\varphi^3 \frac{\bar{\varphi}}{D} + n_\varphi^2 \left(\frac{\bar{\varphi}}{2} - 2 \frac{\text{sh}^2(\bar{\varphi}/2)}{\text{sh} \bar{\varphi}} \right) = r^2 p_i^2 \left(\frac{\bar{\varphi}}{2} - 2 \frac{\text{sh}^2(\bar{\varphi}/2)}{\text{sh} \bar{\varphi}} \right). \quad (6.9)$$

Отсюда, например, для полуцилиндрической оболочки ($\bar{\varphi} = 180^\circ$) получаем:

при $\bar{D} = 100$ по теории 1-го порядка $\bar{n}_\varphi = 0,988$;

по теории 2-го порядка $\bar{n}_\varphi = 0,975$;

при $\bar{D} = 10$ по теории 1-го порядка $\bar{n}_\varphi = 0,905$;

по теории 2-го порядка $\bar{n}_\varphi = 0,845$.

Таким образом, расчет на основе теории 2-го порядка приводит к меньшим усилиям (и большим перемещениям), причем различия с теорией 1-го порядка оказываются существенными, как и выше, при малых значениях жесткости оболочки при растяжении.

6.4.5. Влияние жесткости оболочки при сдвиге. Ткань, которая в исходном состоянии не сопротивляется перекоосу, приобретает после нанесения покрытия некоторую жесткость при сдвиге. Точная оценка ее влияния на основании испытаний ткани на растяжение представляется проблематичной, как показывают результаты, приведенные в работах [16, 24]. Поэтому в работе [15] были выполнены в параметрической форме расчеты оболочки типа 1 при поперечном ветре, в которых варьировались значения жесткости оболочки при сдвиге. При этом были приняты те же предпосылки, что и выше, а характеристики материала взяты из работы [24]. Схематично результаты расчета сводятся к следующему. С увеличением сдвиговой жесткости усилия n_φ в верхней средней части оболочки незначительно убывают, а вблизи торцов незначительно возрастают. Аналогичным образом изменяются усилия n_φ , особенно в верхней части оболочки (здесь усилия снижаются почти на 50 % при 16-кратном увеличении сдвиговой жесткости). В переходной зоне между цилиндрической частью оболочки и торцом усилия n_φ слабо возрастают в верхней части оболочки и незначительно убывают в направлении к опорам, а усилия n_φ сильно возрастают в верхней части оболочки (примерно на 50 % при 16-кратном увеличении сдвиговой жесткости). Эти результаты особенно важны, поскольку именно в оболочке типа 1 наблюдается значительная концентрация напряжений в верхней части у торцов (см. рис. 10 и 11). В этой зоне, в силу принятого раскроя, сгруппировано много швов, жесто-

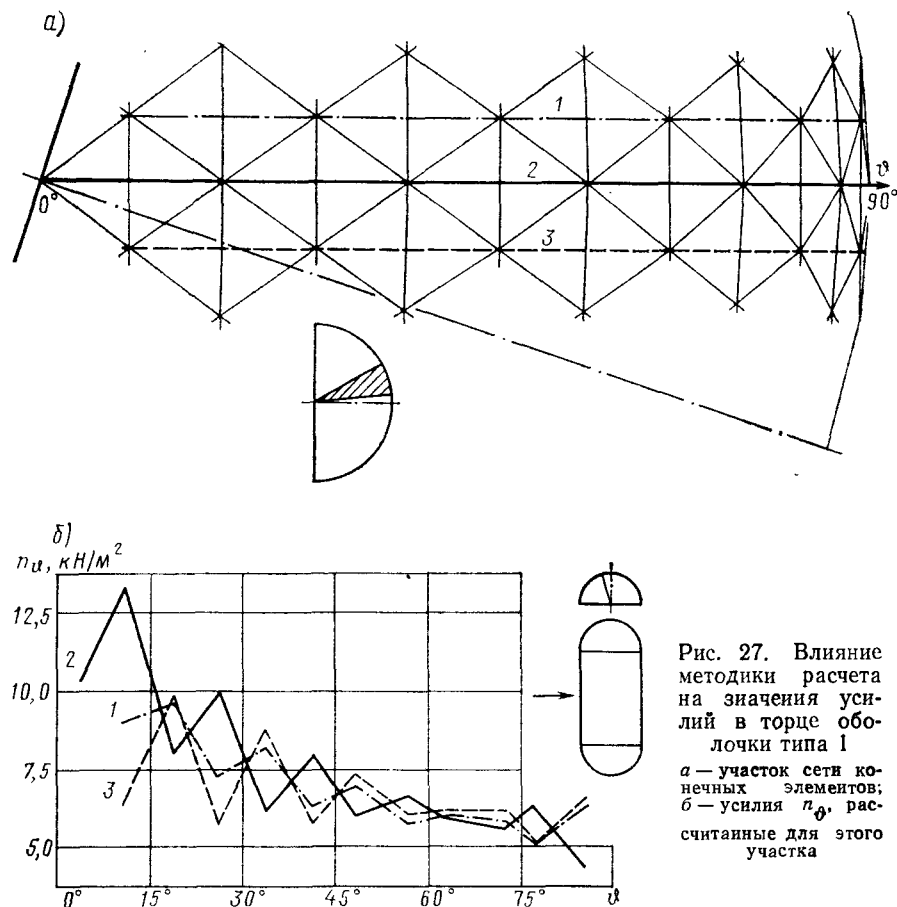


Рис. 27. Влияние методики расчета на значения усилий в торце оболочки типа 1
а — участок сети конечных элементов;
б — усилия p_ϕ , рассчитанные для этого участка

чающих оболочку; в расчете такой эффект может быть учтен путем введения некоторой фиктивной сдвиговой жесткости. При этом как следствие возможно существенное перераспределение напряжений в оболочке, что оказывается важным с точки зрения ее экономичности и надежности.

6.4.6. Влияние методики численного расчета. Как уже было отмечено в разд. 5, значения усилий в оболочке определенным образом зависят от самой методики расчета; там же были перечислены соответствующие факторы, специфичные для расчета на основе МКЭ. Влияние этих факторов особенно отчетливо обнаруживается в приведенных выше результатах расчета оболочки типа 1. Поясним это на примере усилий в торцевой части оболочки. На рис. 27 показаны участок сети конечных элементов и рассчитанные для этого участка усилия p_ϕ . Отдельные значительные «скачки» усилий в смежных элементах не могут быть объяснены только локальной изменчивостью значений ветрового давления; скорее здесь играют

существенную роль форма конечных элементов и конфигурация их сети. В действительности изменение усилий должно иметь более плавный характер, как показано на рис. 11, б. На погрешность такого рода при определении максимальных усилий n_ϕ уже было указано выше.

Аналогичные эффекты, хотя и менее ярко выраженные, обнаруживаются и в других зонах оболочки типа 1, особенно при определении усилий в опорном контуре. Это наблюдение приводит к мысли, что причины погрешностей, подобных проиллюстрированным на рис. 27, кроются и в самой методике расчета. Ради полноты картины отметим, что для оболочки типа 2 подобных «скачков» в усилиях не наблюдалось, за исключением отдельных участков вблизи опорного контура (см. рис. 15 и 17).

7. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ УСИЛИЙ

7.1. Общие положения. Чтобы избежать необходимости вновь производить трудоемкие расчеты для каждого конкретного сооружения, представляется целесообразным получить приближенные формулы для определения основных усилий в оболочках. Это целесообразно еще и для сопоставления расчетных формул, принятых в различных странах. Для рассматриваемых здесь типичных форм оболочек будем считать справедливым линейное соотношение [см. (6.6)]

$$n(\omega + p_i) = \alpha q r + \beta p_i r, \quad (7.1)$$

которое в такой форме приводится также в ряде национальных норм. Сопоставительный анализ, выполненный в работе [9], показывает, что значения коэффициентов α и β в общем могут быть приняты постоянными. При этом безразмерные значения усилий

$$\bar{n} = n/(qr) = \alpha + \beta \eta \quad (7.2)$$

оказываются линейно зависящими от отношения внутреннего давления к скоростному напору ветра

$$\eta = p_i/q. \quad (7.3)$$

Справедливость этих допущений подтверждается приведенными выше численными результатами расчетов. При этом согласно разделу 6, усилия в кольцевом и меридиональном направлениях являются локально переменными и зависят от направления ветра, формы торцов оболочек и абсолютной интенсивности нагрузок.

Эти общие положения должны быть конкретизированы применительно к значениям коэффициентов α и β . Как было отмечено в п. 6.2.5, значения α и β , входящие в формулу (7.2), будут здесь определены иначе, чем это было сделано в п. 6.2.5. Если там за основу было принято определение усилий $n(\omega)$, то теперь мы будем представлять усилия $n(\omega + p_i)$ в форме (7.2). Для этого используем следующую методику. Разделив суммарное усилие $n(\omega + p_i)$ на qr , получим нормированную величину усилия $\bar{n}(\omega + p_i)$.

При этом каждому фиксированному значению p_i будут соответствовать три различных значения $\bar{n}(w+p_i)$ для различных значений скоростного напора (при $\eta=p_i/q=0,4; 0,6; 0,8$). Указанные три значения $\bar{n}(w+p_i)$ могут быть аппроксимированы одной линейной зависимостью от η согласно (7.2). Тогда, например, на основе численных значений, приведенных в п. 6.2.5 для оболочки типа 1 с радиусом $r=10$ м, получим результаты, приведенные в табл. 2

Таблица 2

$\eta=p_i/q$	$q, \text{кН/м}^2$	$p_i=0,30 \text{ кН/м}^2$			
		$n_\Phi, \text{кН/м}$	$\bar{n}_\Phi$	$n_\Phi, \text{кН/м}$	$\bar{n}_\Phi$
0,4	0,75	7,82	1,043	6,93	0,924
0,6	0,50	6,17	1,234	5,60	1,120
0,8	0,375	5,35	1,427	4,87	1,299

Отсюда:

$$\bar{n}_\Phi = 0,66 + 0,96\eta; \quad \bar{n}_\Phi = 0,55 + 1,94\eta,$$

что с удовлетворительной точностью дает табличные значения (погрешность составляет около 1 %).

Как показывает сравнение с данными п. 6.2.5, найденные таким образом значения β нельзя использовать, например, для определения усилий $n(p_i)$ согласно выражению (6.1), так как там получено $\beta_\Phi=0,54$, а здесь $\beta_\Phi=0,94$. Однако преимущество использованной здесь методики заключается, в частности, в том, что нормированное суммарное усилие $\bar{n}(w+p_i)$ всегда может быть с достаточной точностью найдено из линейной зависимости (7.2) при фиксированных значениях α и β . В то же время при использовании методики, приведенной в п. 6.2.5, значение α_Φ , например, уже не было бы константой, либо погрешность при линеаризации согласно (7.2) оказалась бы чрезмерно большой.

7.2. Полуцилиндрическая оболочка на прямоугольном плане. Рассмотрим вначале полуцилиндрическую оболочку с торцами на прямоугольном плане (типа 2). На рис. 28 и 29 приведены распределения основных усилий в оболочке для трех значений внутреннего давления $p_i=0,30; 0,45; 0,60 \text{ кН/м}^2$ и для трех значений скоростного напора ветра (при $\eta=0,4; 0,6; 0,8$), при поперечном и «косом» ветре. Зависимость от η и p_i усилий в средней точке («зените») оболочки показана на рис. 28, а, максимальных усилий в цилиндрической части оболочки — на рис. 28, б и максимальных усилий в торце оболочки — на рис. 28, в. Усилия представлены в безразмерной форме согласно выражению (7.2). Общей для всех случаев является практически линейная зависимость усилий от отношения $\eta=p_i/q$. Усилия n_Φ зависят, кроме того, еще от внутреннего давления (или, эквивалентным образом, от скоростного напора ветра), что не наблюдается для кольцевых усилий. Значения усилий n_Φ подчиняют-

ся линейным зависимостям (7.1) и (7.2) при постоянных значениях коэффициентов α и β и выражаются следующими формулами: в средней точке цилиндрической оболочки (рис. 28, а):

$$\bar{n}_\Phi = 0,85 + 1,00\eta \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.4a)$$

$$\bar{n}_\Phi = 0,61 + 1,00\eta \quad (\text{поперечный ветер}); \quad (7.4b)$$

максимальные в цилиндрической части оболочки (рис. 28, б):

$$\bar{n}_\Phi = 1,01 + 1,00\eta \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.5a)$$

$$\bar{n}_\Phi = 0,64 + 1,00\eta \quad (\text{поперечный ветер}); \quad (7.5b)$$

максимальные в торцевой части (рис. 28, в):

$$\bar{n}_\Phi = 0,96 + 1,00\eta \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.6a)$$

$$\bar{n}_\Phi = 0,57 + 1,00\eta \quad (\text{поперечный ветер}). \quad (7.6b)$$

Иначе обстоит дело с усилиями n_Φ ; для них линейные соотношения (7.1) и (7.2) оказываются уже несправедливыми, поскольку не учитывают зависимости усилий еще и от внутреннего давления (т. е. влияния интенсивности нагрузок). Поэтому в работе [10] для усилий n_Φ получены эмпирические выражения в форме произведения двух функций:

$$\bar{n}_\Phi = f_1(\eta) f_2(p_i), \quad (7.7)$$

основанные на простой интерполяции. В соответствии с этими выражениями для верхней средней части цилиндрической оболочки (рис. 28, а) имеем:

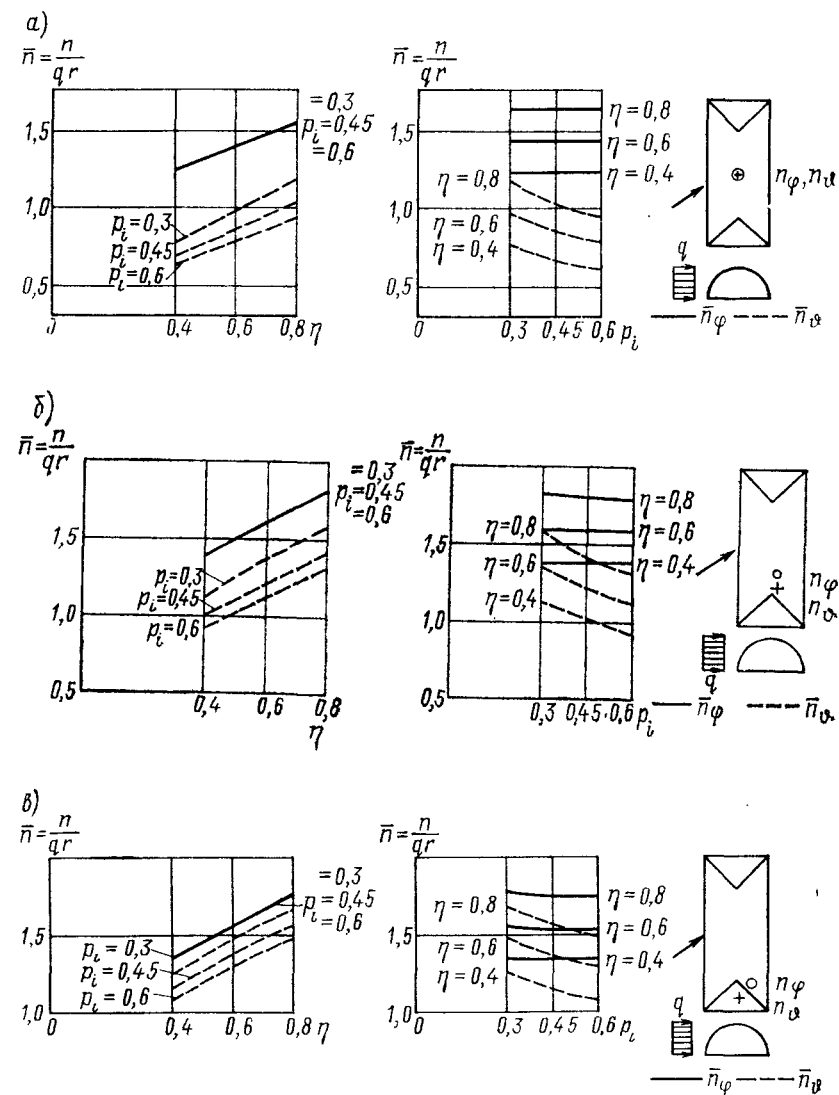
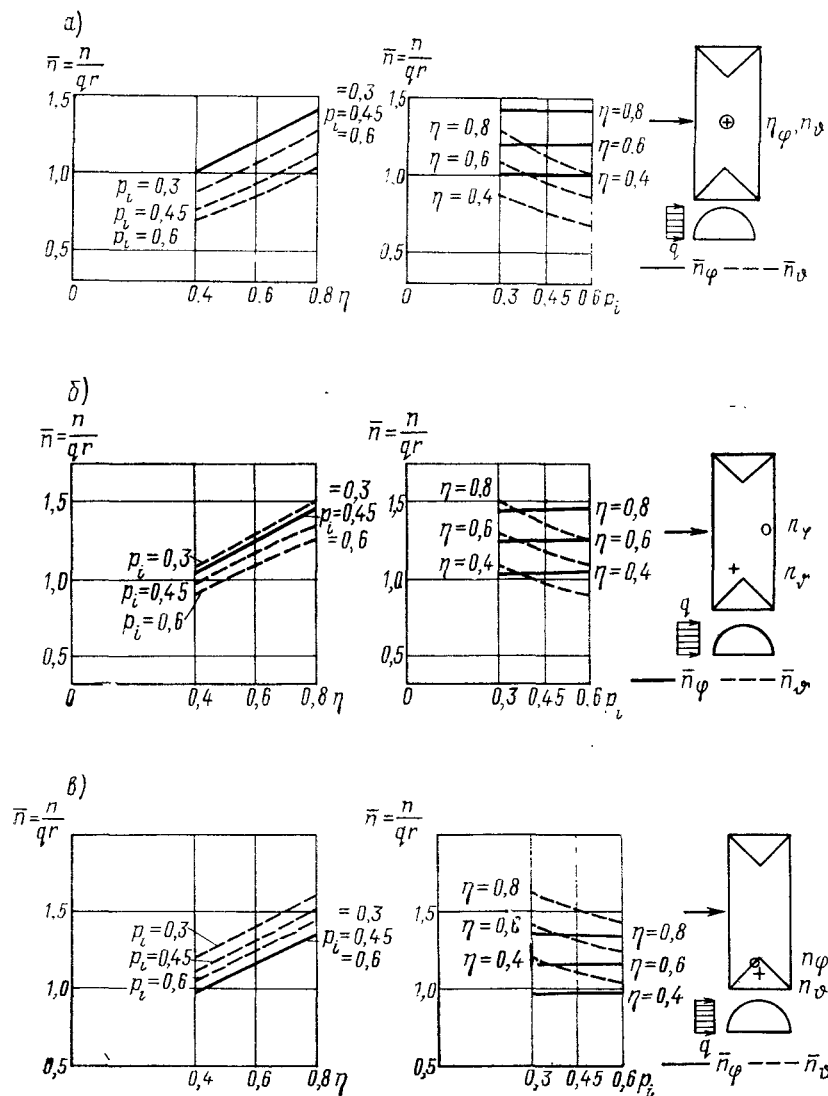
$$\bar{n}_\Phi = (1,00 + 2,70\eta)(0,25 + 0,036/p_i) \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.8a)$$

$$\bar{n}_\Phi = (1,00 + 2,40\eta)(0,29 + 0,045/p_i) \quad (\text{поперечный ветер}). \quad (7.8b)$$

Возможны, разумеется, и другие формы представления усилий, где в качестве параметра может быть принято не внутреннее давление, а скоростной напор ветра.

Недостатком приведенных выше выражений является то, что они не являются безразмерными (здесь приняты размерности кН и м). Как отмечено в работе [10] и как поясняется в п. 6.4.4, в качестве параметра для приведения этих выражений (в том числе и для n_Φ) к безразмерному виду удобно использовать нормированную жесткость оболочки при растяжении $\bar{D}=D/(p_i r)$.

Чтобы найти наиболее удобную форму представления усилий, необходимо выполнить еще значительное число расчетов и детальнее исследовать влияние различных факторов на напряженно-деформированное состояние оболочек. Поэтому пока что наиболее целесообразно пользоваться линейными приближениями, в том числе и для учета внутреннего давления. Если, например, принять, что внутреннее давление в оболочке не опускается ниже $0,30 \text{ кН/м}^2$, то для усилий n_Φ получим следующие выражения (с запасом):



в средней точке цилиндрической оболочки (см. рис. 28, а):

$$\bar{n}_\phi = 0,37 + 1,00\eta \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.9a)$$

$$\bar{n}_\phi = 0,44 + 1,06\eta \quad (\text{поперечный ветер}); \quad (7.9б)$$

максимальные усилия в цилиндрической части оболочки (рис. 28, б):

$$\bar{n}_\phi = 0,67 + 1,14\eta \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.10a)$$

$$\bar{n}_\phi = 0,66 + 1,06\eta \quad (\text{поперечный ветер}); \quad (7.10б)$$

Рис. 28. Зависимость усилий в оболочке типа 2 от нагрузок при поперечном и «косом» ветре (p_i в кН/м^2)

а — в средней точке («зените»); б — максимальных в цилиндрической части; в — то же, в торцевой части

максимальные усилия в торцевой части (рис. 28, в):

$$\bar{n}_\phi = 0,80 + 1,12\eta \quad (\text{«косой» ветер}), \quad (7.11a)$$

$$\bar{n}_\phi = 0,77 + 1,07\eta \quad (\text{поперечный ветер}). \quad (7.11б)$$

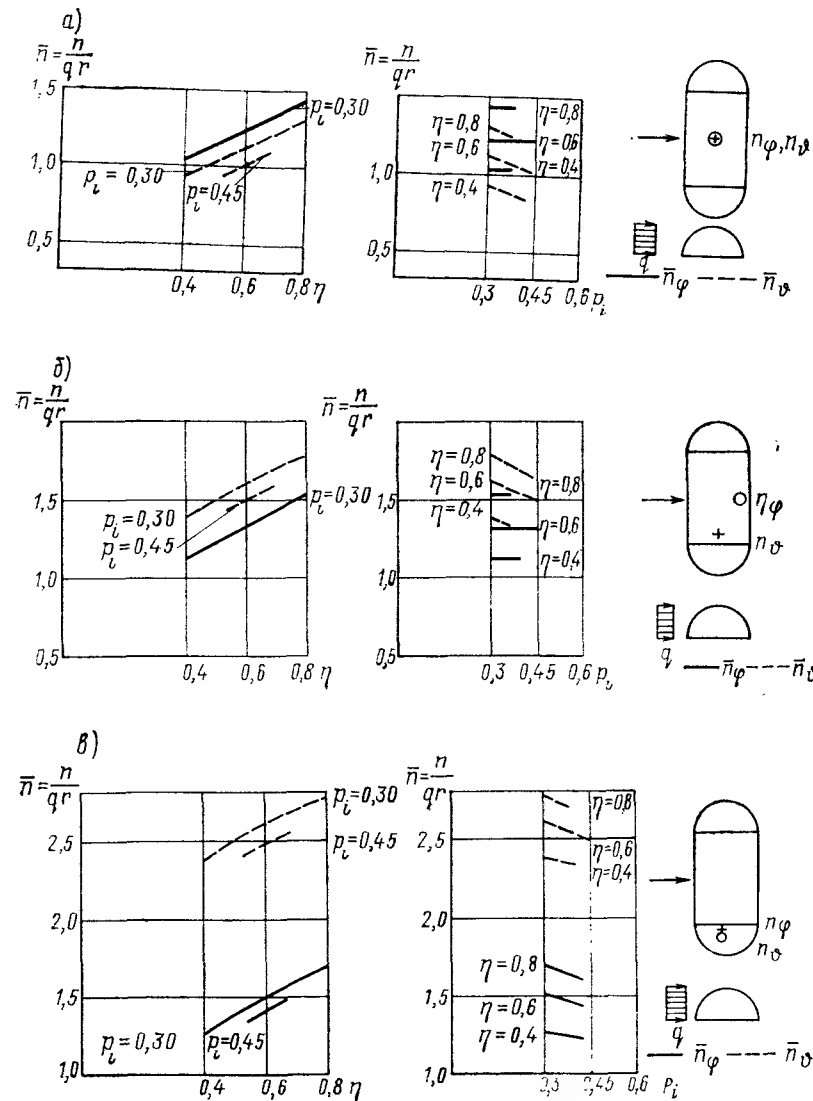


Рис. 29. Зависимость усилий в оболочке типа 1 от нагрузок при поперечном ветре (p_i в кН/м^2)

а — в средней точке; б — максимальных в цилиндрической части; в — то же, в торце

Аналогичные линейные выражения получаются при $p_i=0,45$ и $p_i=0,60 \text{ кН/м}^2$.

Обобщая приведенные результаты, можно записать следующие приближенные линейные выражения для максимальных усилий в цилиндрической и торцевой частях оболочки (эти усилия во всех случаях соответствуют «косому» ветру):

в цилиндрической части:

$$n_\phi(\omega + p_i) = 1,01qr + 1,00p_i r; \quad (7.12)$$

$$n_\delta(\omega + p_i) = \begin{cases} 0,67qr + 1,14p_i r & \text{при } p_i \geq 0,30 \text{ кН/м}^2; \\ 0,60qr + 1,02p_i r & \text{при } p_i = 0,45 \text{ кН/м}^2; \\ 0,56qr + 0,95p_i r & \text{при } p_i = 0,60 \text{ кН/м}^2; \end{cases} \quad (7.13a) \quad (7.13b) \quad (7.13в)$$

в торцевой части:

$$n_\phi(\omega + p_i) = 0,96qr + 1,00p_i r; \quad (7.14)$$

$$n_\delta(\omega + p_i) = \begin{cases} 0,80qr + 1,12p_i r & \text{при } p_i \geq 0,30 \text{ кН/м}^2; \\ 0,74qr + 1,04p_i r & \text{при } p_i = 0,45 \text{ кН/м}^2; \\ 0,71qr + 0,99p_i r & \text{при } p_i = 0,60 \text{ кН/м}^2; \end{cases} \quad (7.15a) \quad (7.15b) \quad (7.15в)$$

Соответствующие усилия от действия одного только внутреннего давления:

в цилиндрической части:

$$n_\phi(p_i) = 0,97p_i r; \quad (7.16)$$

$$n_\delta(p_i) = \begin{cases} 0,79p_i r & \text{при } p_i \geq 0,30 \text{ кН/м}^2; \\ 0,74p_i r & \text{при } p_i = 0,45 \text{ кН/м}^2; \\ 0,71p_i r & \text{при } p_i = 0,60 \text{ кН/м}^2; \end{cases} \quad (7.17a) \quad (7.17b) \quad (7.17в)$$

в торцевой части:

$$n_\phi(p_i) = 0,95p_i r; \quad (7.18)$$

$$n_\delta(p_i) = \begin{cases} 0,86p_i r & \text{при } p_i \geq 0,30 \text{ кН/м}^2; \\ 0,82p_i r & \text{при } p_i = 0,45 \text{ кН/м}^2; \\ 0,79p_i r & \text{при } p_i = 0,60 \text{ кН/м}^2; \end{cases} \quad (7.19a) \quad (7.19b) \quad (7.19в)$$

Отсюда могут быть приближенно определены и усилия $n(\omega)$.

7.3. Полуцилиндрическая оболочка с торцами на круговом плане.

Для данного типа оболочки к настоящему моменту получены результаты расчетов пока только для поперечного ветра и четырех сочетаний нагрузок: $p_i=0,30 \text{ кН/м}^2$ при $q=0,375; 0,50; 0,75 \text{ кН/м}^2$ и $p_i=0,45 \text{ кН/м}^2$ при $q=0,75 \text{ кН/м}^2$. Тем не менее даже на основании этих результатов уже можно сделать важные выводы, если обратиться к рис. 29 (который является неполным из-за недостатка численных данных). Усилия в цилиндрической части оболочки подчиняются тем же закономерностям, что и для оболочки с торцами на прямоугольном плане: они практически линейно зависят от отношения $\eta = p_i/q$, а усилия n_δ — еще и от внутреннего давления. Полученную из расчета зависимость усилий n_ϕ в полусферическом торце от внутреннего давления нельзя считать вполне достоверной; здесь, по-видимому, играют определенную роль погрешности численного расчета, что отчасти разъясняется в п. 6.4.4. Таким образом, не следует переоценивать точность полученных значений усилий n_ϕ , особенно непосредственно в переходной зоне между цилиндрической и сферической частями оболочки. Видимые на рис. 29 «пики» в усилиях n_δ также связаны с особенностями численного расчета; аналогичные эпюры усилий на рис. 11 «сглажены». На основе результатов расчета при $p_i=0,30 \text{ кН/м}^2$ получены следующие линейные выражения для усилий:

в средней точке цилиндрической оболочки (см. рис. 29, а):

$$\bar{n}_\varphi = 0,66 + 0,96\eta, \quad (7.20) \quad \bar{n}_\theta = 0,55 + 0,94\eta; \quad (7.21)$$

максимальных в цилиндрической части оболочки (рис. 29, б):

$$\bar{n}_\varphi = 0,70 + 1,04\eta, \quad (7.22) \quad \bar{n}_\theta = 0,98 + 1,02\eta; \quad (7.23)$$

максимальных в торцевой части (рис. 29, в):

$$\bar{n}_\varphi = 0,83 + 1,08\eta, \quad (7.24) \quad \bar{n}_\theta = 1,99 + 0,97\eta. \quad (7.25)$$

Существенно отметить, что в приведенных уравнениях коэффициент при η везде близок к 1,0, тогда как во многих национальных нормах его значение принято равным примерно 0,5 (для усилий n_φ в торцах оболочки и для всех усилий n_θ); этот результат объясняется принятой в п. 7.1 методикой определения усилий. Усилия в цилиндрической части оболочки не отличаются существенно от соответствующих усилий в оболочке с торцами на прямоугольном плане, при том же поперечном направлении ветра. Несколько больше оказываются лишь максимальные значения усилий (вблизи торцов); в «невозможной» средней зоне оболочки значения усилий почти не меняются. Что же касается максимальных усилий n_θ , то они в данном случае имеют существенно более высокие значения — прямое следствие изменения формы торцов.

Для максимальных усилий при поперечном ветре и при $p_i = 0,30$ кН/м² получены следующие приближенные линейные зависимости:

в цилиндрической части оболочки:

$$n_\varphi(\omega + p_i) = 0,70qr + 1,04p_i r, \quad (7.26)$$

$$n_\theta(\omega + p_i) = 0,98qr + 1,02p_i r; \quad (7.27)$$

в торцевой части:

$$n_\varphi(\omega + p_i) = 0,83qr + 1,08p_i r, \quad (7.28)$$

$$n_\theta(\omega + p_i) = 1,99qr + 0,97p_i r. \quad (7.29)$$

При «косом» ветре, по аналогии с оболочкой, имеющей торцы на прямоугольном плане, следует ожидать более высоких значений усилий.

Соответствующие усилия только от внутреннего давления определяются выражениями:

в цилиндрической части оболочки:

$$n_\varphi(p_i) = 1,03p_i r, \quad (7.30)$$

$$n_\theta(p_i) = 0,63p_i r \text{ при } p_i \geq 0,30 \text{ кН/м}^2; \quad (7.31)$$

в торцевой части:

$$n_\varphi(p_i) = 0,60p_i r, \quad (7.32)$$

$$n_\theta(p_i) = 0,68p_i r \text{ при } p_i \geq 0,30 \text{ кН/м}^2. \quad (7.33)$$

Отсюда могут быть также приближенно вычислены значения усилий $n(\omega)$.

7.4. Сравнение с различными национальными нормами. Сопоставим значения усилий в оболочках, полученные из расчета численным методом и из приведенных выше приближенных линейных зависимостей, с соответствующими значениями, установленными в национальных нормах или инструкциях Великобритании [29], Японии [30], ГДР [31] и ФРГ [32].

7.4.1. Полуцилиндрическая оболочка с торцами на прямоугольном плане. Нормы Великобритании и Японии не содержат специальных указаний. Нормы ГДР (при $0,30 \leq h/d \leq 0,50$):

цилиндрическая часть:

$$n_\varphi = 1,04qr + 0,58p_i r, \quad n_\theta — \text{нет указаний};$$

торцевая часть:

$$n_\varphi = n_\theta = 1,6qr + 0,8p_i r.$$

Нормы ФРГ (при $b/l = 0,4$ и $h/r = 1,0$):

цилиндрическая часть:

$$n_\varphi = 1,04qr + p_i r, \quad n_\theta = 0,84qr + 0,5p_i r;$$

торцевая часть:

$$n_\varphi = 0,84qr + 0,5p_i r, \quad n_\theta = 1,14qr + 0,5p_i r.$$

Эти данные сведены в табл. 3. Усилия n_φ в цилиндрической части оболочки по нормам [31] слишком малы, в нормах [32] они определены довольно точно; усилия n_θ , наоборот, слишком малы по нормам [32], особенно при небольших нагрузках p_i и q . Усилия n_φ и n_θ в торцевой части оболочки по нормам [31] приняты равными и заметно завышены; в нормах [32], наоборот, слишком малы усилия n_φ . Сравнение при этом сделано с максимальными усилиями, которые соответствуют «косому» ветру и могут в отдельных случаях наблюдаться в действительности.

7.4.2. Полуцилиндрическая оболочка с торцами на круговом плане. Нормы Великобритании (при $b/l = 0,4$ и $h/r = 1,0$):

цилиндрическая часть:

$$n_\varphi = 0,80qr + 1,00p_i r, \quad n_\theta = 1,48qr + 0,50p_i r;$$

торцевая часть:

$$n_\varphi = 1,30qr + 0,50p_i r, \quad n_\theta = 1,30qr + 0,50p_i r.$$

Нормы Японии (при $b/l = 0,4$ и $h/r = 1,0$):

цилиндрическая часть:

$$n_\varphi = 1,00qr + 1,00p_i r, \quad n_\theta = 1,56qr + 0,50p_i r;$$

торцевая часть:

$$n_\varphi = n_\theta = 1,56qr + 0,50p_i r.$$

Нормы ГДР (при $0,30 \leq h/d \leq 0,525$):

цилиндрическая часть:

$$n_\varphi = 1,04qr + 0,58p_i r, \quad n_\theta — \text{нет указаний};$$

Таблица 3. Усилия в оболочке типа 2 (сравнение с национальными нормами)

Зона оболочки и нагрузка, кН/м²	По нормам						Численный расчет			
	ГДР		ФРГ		Линейное приближе- ние (7,16) — (7,19)		при «косом» ветре		при поперечном ветре	
	[31]		[32]							
	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ
Цилиндрическая $q=0,375$ $=0,500$ $=0,750$	5,6	—	6,9	4,7	6,8	5,9	6,8	5,9	5,4	5,6
	6,9	—	8,2	5,7	8,1	6,8	8,0	6,8	6,2	6,5
	9,5	—	10,8	7,8	10,6	8,4	10,4	8,5	7,8	8,1
Торцевая $q=0,375$ $=0,500$ $=0,750$	8,4	8,4	4,7	5,8	6,6	6,4	6,6	6,3	5,1	6,0
	10,4	10,4	5,7	7,2	7,8	7,4	7,8	7,4	5,8	7,1
	14,4	14,4	7,8	10,1	10,2	9,4	10,2	9,4	7,3	9,0
Цилиндрическая $q=0,563$ $=0,750$ $=1,13$	8,5	—	10,4	7,0	10,2	8,0	10,1	8,0	8,2	7,6
	10,4	—	12,3	8,6	12,1	9,1	11,9	9,2	9,3	8,8
	14,3	—	15,9	11,7	15,9	11,3	15,6	11,3	11,7	10,9
Торцевая $q=0,563$ $=0,750$ $=1,13$	12,6	12,6	7,0	8,7	9,9	8,8	9,8	8,8	7,6	8,5
	15,6	15,6	8,6	10,9	11,7	10,2	11,6	10,3	8,7	9,9
	21,6	21,6	11,7	15,1	15,3	13,0	15,1	13,0	11,0	12,5
Цилиндрическая $q=0,750$ $=1,000$ $=1,500$	11,3	—	13,8	9,3	13,6	9,9	13,4	9,9	10,9	9,5
	13,9	—	16,4	11,4	16,1	11,3	15,8	11,3	12,5	10,9
	19,1	—	21,6	15,6	21,1	14,1	20,7	14,0	15,7	13,5
Торцевая $q=0,750$ $=1,000$ $=1,500$	16,8	16,8	9,3	11,6	13,2	11,3	13,0	11,1	10,1	10,7
	20,8	20,8	11,4	14,4	15,6	13,0	15,4	13,0	11,7	12,5
	28,8	28,8	15,6	20,1	20,4	16,6	20,2	16,2	14,7	15,7

Таблица 4. Усилия в оболочке типа 1 (сравнение с национальными нормами)

Зона оболочки и нагрузка, кН/м²	Великобритания		Япония		ГДР		ФРГ		Линейное приближе- ние (7,26) — (7,29)		Численный расчет при поперечном ветре	
	[29]		[30]		[31]		[32]					
	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ	nφ
Цилиндрическая $q=0,375$ $=0,500$ $=0,750$	6,0	7,1	6,8	7,4	5,6	—	6,9	6,2	5,7	6,7	5,8	6,7
	7,0	8,9	8,0	9,3	6,9	—	8,2	7,7	6,6	8,2	6,6	8,0
	9,0	12,6	10,5	13,2	9,5	—	10,8	10,8	8,4	10,4	8,4	10,4
Торцевая $q=0,375$ $=0,500$ $=0,750$	6,4	6,4	7,4	7,4	6,4	6,4	6,2	7,3	6,4	10,4*	6,3	10,4*
	8,0	8,0	9,3	9,3	8,0	8,0	7,7	9,2	7,4	— 12,9*	7,5	13,0*
	11,3	11,3	13,2	13,2	11,3	11,3	10,8	13,1	9,5	17,8*	9,4	17,8*
Цилиндрическая $q=0,45$	10,5	13,4	12,0	14,0	10,4	—	12,3	11,6	9,9	11,9	10,0	11,2
Торцевая $q=0,750$	12,0	12,0	14,0	14,0	12,0	12,0	11,6	13,8	11,1	19,3*	10,6	18,6*

* Неадекватные (по-видимому, завышенные) значения.

торцевая часть:

$$n_{\varphi} = n_{\theta} = 1,3qr + 0,5 p_i r.$$

Нормы ФРГ (при $b/l=0,4$ и $h/r=1,0$):

цилиндрическая часть:

$$n_{\varphi} = 1,04qr + 1,00p_i r, \quad n_{\theta} = 1,24qr + 0,5p_i r;$$

торцевая часть:

$$n_{\varphi} = 1,24qr + 0,5p_i r, \quad n_{\theta} = 1,54qr + 0,5p_i r.$$

Эти данные сведены в табл. 4. Как и в предыдущем случае, между данными различных национальных норм имеются заметные расхождения.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований убедительно показывают, что расчет воздухоопорных оболочек все еще содержит множество «белых пятен». Следует надеяться, что благодаря проведению более интенсивных исследований на моделях и натурных испытаний в сочетании с развитием численных методов расчета показатели надежности воздухоопорных конструкций будут доведены до уровня, достигнутого для других конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bird W. W. Teilon-coated fiberglass, an outstanding new material for fabric structures. Research report IASS Working Group of Pneumatic Structures, Yokohama National University, 1978, S. 2—18.
2. Bubner E. Zur konstruktiven Ausbildung der Wärmedämmung bei Bauwerken aus textilen Materialien. Membrankonstruktionen, Verlag R. Müller, Köln, 1979, S. 21—48.
3. Bubner E. Zum Stand der Technik im Membranbau. Membrankonstruktionen 2, Verlag R. Müller, Köln, S. 17—24.
4. Gerhardt H. J. und C. Kramer. Traglufthallen unter aerodynamischer Belastung. Bauingenieur 51 (1976), S. 125—135.
5. Gerhardt H. J., C. Kramer und H. Jansen. Traglufthallen unter Windbelastung. Forschungsberichte des Landes Nordrhein—Westfalen, Nr. 2650, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1977.
6. Harnach R. Das Problem der verzerrungsfreien Verbiegung der Schalenmittelfläche aus differentialgeometrischer Sicht. Konstruktiver Ingenieurbau/Berichte, Heft 20, Vulkan—Verlag, Essen, 1974, S. 5—34.
7. Harnach R. und W. B. Krätzig. Allgemeine Theorie geometrisch nichtlinearer, insbesondere leichter Flächentragwerke. Techn. — wiss. Mitteilungen Nr. 76—3 des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr—Universität Bochum, 1976.
8. Harnach R., B. Hartmann and H.-J. Niemann. Stresses and Deformations of Pneumatic Structures under Windload and internal pressure. Research report IASS-working group of pneumatic structures. Yokohama National University, 1978.
9. Harnach R. Vorschriften für Berechnung und Betrieb von Tragluftbauten. Membrankonstruktionen, Verlag R. Müller, Köln, 1979, S. 105—126.
10. Harnach R. Load-carrying behavior of cylindrically shaped air supported structures. Acta Univ. Oul. C 16.1980, Artes Constr. 3, S. 579—590.
11. Hartmann B., K. H. Schrader und G. Winkel. MESY — Ein Programmsystem zur Untersuchung von Tragwerken. Konstr. Ingenieurbau/Berichte, Heft 22, Vulkan—Verlag Essen, 1975.
12. Hartmann B. and T. Drewes. On the numerical analysis of pneumatic structures. in Druck.
13. Haug E. und G. H. Powell. Finite element analysis of nonlinear membrane structures. Proc. 1971 IASS Pacific Symposium Part II on «Tension Structures and Space Frames», Tokyo and Kyoto, S. 165—175.
14. Haug E. und J. Oelbermann. Numerical design and analysis of pneumatic structures. CIB — International Symposium on air supported structures, Venedig, 1977.
15. Hockeler A. und J. Oelbermann. Numerische Parameterstudien an einer luftgetragenen Halle mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente-Forschungsbericht. Formfindung vorgespannter Membrankonstruktionen, Essen, 1979.
16. Horcic M. Windbelastung und Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes im zylindrischen Teil von Traglufthallen mit besonderer Berücksichtigung des Konstruktionsmaterials. Diss. ETH Zürich, 1974.
17. Koenen R. und E. Luksch. Untersuchungen und Überlegungen zu Abschlußgeometrien luftgetragener Hallen mit zylindrischem Mittelteil. Membrankonstruktionen 2, Verlag R. Müller, Köln 1980, S. 25—40.
18. Krummheuer W. Mechanical properties of PVC-coated polyester fabrics and their joints. Research report IASS Working Group of Pneumatic Structures, Yokohama National University, 1978, S. 28—37.
19. Meffert B. Mechanische Eigenschaften PVC-beschichteter Polyestergewebe. Dissertation, Aachen, 1978.
20. Niemann H.-J. Zur Windbelastung von Tragluftbauten. Konstruktiver Ingenieurbau/Berichte, Heft 13, Vulkan-Verlag, Essen, 1972.
21. Oelbermann J. Ausführung und Berechnung von luftgetragenen Hallen nach der geplanten DIN 4134 und nach der Methode der Finiten Elemente. Membrankonstruktionen, Verlag R. Müller, Köln, 1979, S. 87—104.
22. Otto F. Zugbeanspruchte Konstruktionen. Vol. 1, Ullstein-Fachverlag, Frankfurt/Berlin, 1962.

23. Petersen Ch. Zur Sicherheit von Tragfluthallen. Bauingenieur 50 (1975), S. 117—123.
24. Rehm G. und R. Münsch. Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Gebrauchslastbereich und zum Bruchverhalten von PVC-beschichteten Polyestergerweben. Symposium Weitgespannte Flächentragwerke, Vol. 1, Stuttgart, 1979.
25. Rehm G. und R. Münsch. Zweiachsige Langzeit—Zugversuche an PVC—beschichteten Polyestergerweben. Symposium Weitgespannte Flächentragwerke, Vol. 1, Stuttgart, 1979.
26. Röntsch G. und F. Böhme. Modellstatische Untersuchungen für eine als Halbzylinder mit Viertelkugelabschlüssen ausgebildete Tragfluthülle. Wiss. Zeitschr. Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 17 (1968), S. 183—189.
27. Schulz H. Die Konstruktion und Berechnung von Membrantragwerken. Bautechnik 54 (1977), S. 242—249 und 281—283.
28. Spinelli P. Windeffects on a cylindrical air supported structure. Proc. 3rd Colloquium on Industrial Aerodynamics, Aachen 1978, S. 179—193.
29. DD50: 1976. Draht for Development, air supported structures, Großbritannien, 1976.
30. Pneumatic Structure Design Standard and Commentary, Japan, 1970.
31. TGL 10728/03, Tragfluthallen, Deutsche Demokratische Republik, 1976.
32. DIN 4134, Tragfluthbauten: Berechnung, Ausführung und Betrieb, Bundesrepublik Deutschland (Bearbeitungsstand Juli 1980).

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие

I. Мировая практика пневматических сооружений

- Прошлое, настоящее и будущее пневматических строительных конструкций. В. В. Ермолов 5
- Пневматические конструкции в США. У. У. Бэрд (Перевод с английского А. И. Маньшавина) 47
- Материалы и конструктивные формы пневматических сооружений и их применение в ФРГ. Э. Бубнер (Перевод с немецкого С. Б. Ермолова) 83
- Пневматические сооружения в Финляндии. Л. Виттинг (перевод со шведского К. Е. Мурадян) 112
- Пневматические конструкции в СССР. С. Б. Вознесенский 138
- Пневматические строительные конструкции в ЧССР. З. Голуб, Л. Штепанек (перевод с чешского Н. Г. Рыжковой) 158

II. Проектирование воздухоопорных зданий

- Особенности архитектуры пневматических воздухоопорных сооружений. Ю. Н. Орса 170
- Пневматические сооружения на международных выставках. Ю. Мурата (перевод с английского С. Б. Ермолова) 188
- Пневматические конструкции в плавательных бассейнах и сооружениях для спорта и отдыха. Й. Линекер (перевод с немецкого С. Б. Ермолова) 200
- Двухслойное воздухоопорное покрытие, усиленное канатами. Э. Фрицше, Г. Вольф, Г. Айзенхут (перевод с немецкого С. Б. Ермолова) 217

III. Материалы пневматических оболочек

- Свойства тканей с покрытием из ПВХ, применяемых в пневматических конструкциях. В. Круммхойер (перевод с английского С. Б. Ермолова) 224
- Стеклоткань, покрытая тефлоном,—уникальный новый материал для тканевых сооружений. У. У. Бэрд (перевод с английского А. И. Маньшавина) 239
- Улучшенные высокопрочные материалы для оболочек. Д. Л. Г. Старджен, М. В. Уардл (перевод с английского С. Б. Ермолова) 261

IV. Расчет пневматических конструкций

- Проектирование и расчет пневматических сооружений. К. Ниши (перевод с английского Н. И. Александровой) 273
- Техническая теория мягких оболочек и ее применение для расчета пневматических конструкций. В. И. Усюкин 299
- Проектирование и расчет пневматических конструкций с использованием метода конечных элементов. Э. Хауг (перевод с английского С. Б. Ермолова) 333
- Проектирование пневматических сооружений с помощью ЭВМ в режиме диалога «человек — машина». М. Майовецки, Дж. Тирони (перевод с английского А. И. Маньшавина) 361
- Расчет воздухоопорных сооружений на ветровые нагрузки. Р. Харнах (перевод с немецкого С. Б. Ермолова) 383